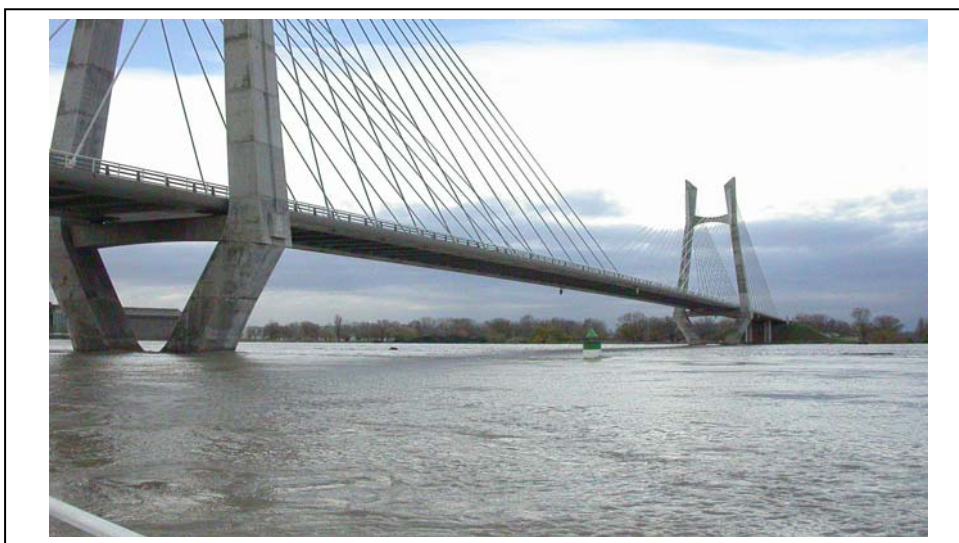


***Conférence de consensus sur le débit du Rhône à
Beaucaire pour la crue de Décembre 2003***

CONTRIBUTION CNR



Pont de Beaucaire-Tarascon PK 269.60 – photo prise le 3 décembre 2003

ANNEXE V

**Estimation des incertitudes des débits calculés à partir des
relations hauteur/débit**

Etude du CETIAT pour le compte de la CNR



Destinataire :

CNR

4 rue Chalon sur Saône

69007 Lyon

A l'attention de Monsieur M. Scotti

Villeurbanne, le 03/06/2005

Responsable de l'étude : **Bertrand Blanquart**

Signature :

Rapport d'étude N° 2460059

Révision : 02

**Estimation des incertitudes des débits
calculés à partir des relations hauteur-débit**

CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES AÉRAULIQUES ET THERMIQUES

Adresse postale : BP 2042 - 69603 Villeurbanne Cedex - France - Tél. +33 (0)4 72 44 49 00 - Fax. +33 (0)4 72 44 49 49

Adresse : Domaine Scientifique de la Doua - 25, avenue des Arts - 69100 Villeurbanne

Livraisons : Domaine Scientifique de la Doua - 54, avenue Niels Bohr - 69100 Villeurbanne

www.cetiat.fr - E. Mail : cetiat.commercial@cetiat.fr - Siret 775 686 967 00024 - Ape 731 Z

Révision	Date	Nature de la modification	Pages modifiées
00	01/04/2005	Première diffusion	
01	18/05/2005	Modifications suite à réunion CNR du 11 mai 2005	toutes
02	30/05/2005	Modifications suite à réunion CNR du 30 mai 2005	toutes
03	03/06/2005	Modifications suite à relecture du 31 mai 2005	toutes

Chaque révision annule et remplace la précédente.

Les résultats et les rapports d'essais sont la propriété exclusive du demandeur et le CETIAT s'interdit leur communication à des tiers sauf autorisation écrite.

Toute utilisation commerciale du nom du CETIAT et des résultats d'essais est soumise à l'accord préalable du CETIAT.

La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Les rapports d'essais établis par le CETIAT ne sont valables que pour le matériel qui lui a été présenté, et dans les conditions particulières de l'essai.

Les informations relatives aux équipements de mesure utilisés pour les essais sont conservées dans le dossier archivé au CETIAT.

L'utilisation de ces résultats pour le dimensionnement d'installations utilisant ce matériel doit tenir compte des tolérances de fabrication, des conditions réelles d'exploitation et ne relève donc pas de la responsabilité du CETIAT.

Les formules ou codes utilisés pour prévoir soit le fonctionnement d'un appareil dans des conditions autres que celles de l'essai, soit les caractéristiques d'appareils semblables mais de dimensionnement différent tiennent compte de l'état des connaissances au moment de la livraison des résultats et sont susceptibles d'évolution. Les résultats obtenus par ces formules ou codes de calcul sont donnés de façon indicative.

L'exemplaire original du rapport est remis au client, une copie certifiée conforme est conservée au CETIAT.

SOMMAIRE

1.	Contexte de l'étude	4
2.	Synthèse	6
3.	Description de la méthode générale (approche métrologique)	11
3.1.	Incertitudes sur les valeurs de référence (débits jaugés).....	11
3.2.	Construction de la courbe d'interpolation	12
3.2.1.	Introduction	12
3.2.2.	Construction de la courbe d'interpolation par ajustement aux moindres carrés.....	13
3.2.3.	Préconisations sur le choix de la loi dans le cas général	15
3.3.	Lecture de la courbe	15
3.3.1.	Introduction	15
3.3.2.	Estimation des incertitudes sur les mesures de niveau d'eau.....	16
3.4.	Combinaison des trois composantes.....	18
•	Redondance des composantes.....	19
4.	Application à l'exemple de Beaucaire - Examen d'une courbe simple.....	21
4.1.	Qualification des mesures et incertitudes associées aux valeurs expérimentales.....	21
4.2.	Qualité de l'interpolation	23
4.2.1.	Régression polynomiale	24
4.2.2.	Loi puissance	25
4.2.3.	Loi de Manning-Strickler	26
4.2.4.	Écart entre les lois et choix de la loi	28
4.2.5.	Conclusion sur la qualité de l'interpolation	29
4.3.	Propagation des incertitudes de mesure de niveau d'eau	30
4.3.1.	Incertitudes des mesures de niveau	30
4.3.2.	Pente de la courbe de Beaucaire	33
4.4.	Combinaison des incertitudes	33
4.5.	Analyses complémentaires sur l'exemple de Beaucaire	36
4.5.1.	Distinction de deux sous-domaines	36
4.5.2.	Évolution de la courbe dans le temps.....	36
4.6.	Bilan	38
5.	Conclusion générale	40
6.	Annexes	41

1. Contexte de l'étude

La société CNR réalise des mesures de jaugeage du Rhône et de ses affluents en un certain nombre de stations déterminées, par la méthode dite point par point au moulinet et à l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), qui par effet Doppler détermine la vitesse de l'écoulement en tout point d'une section. Les débits obtenus permettent de réaliser des courbes $Q=f(h)$ qui sont ensuite utilisées pour déterminer le débit instantané à partir d'une mesure de hauteur d'eau.

La CNR souhaite déterminer l'incertitude de mesure sur l'ensemble de la chaîne de mesure, que le jaugeage soit réalisé au moulinet ou à l'ADCP.

Le processus d'estimation des incertitudes sur les débits issus des courbes de tarage $Q(h)$ peut se décomposer en 6 étapes :

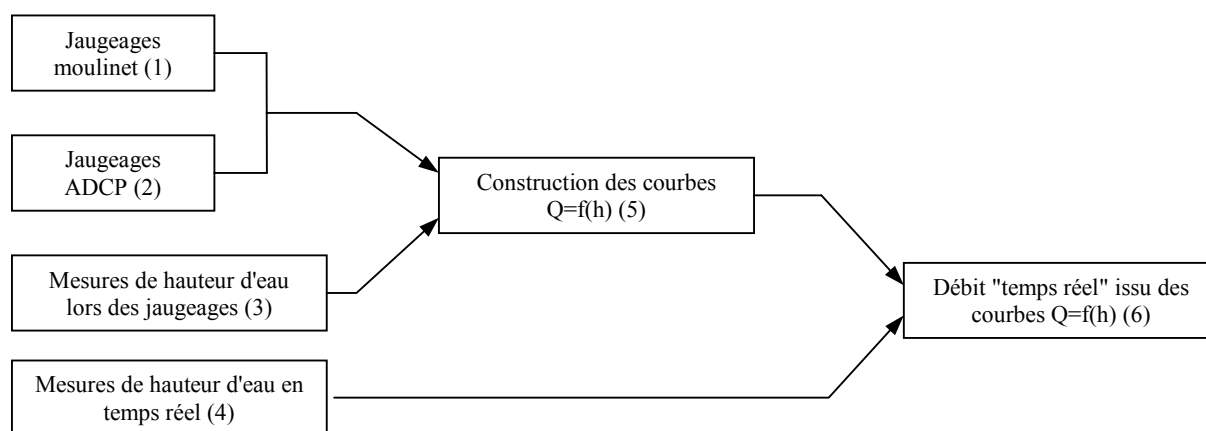


Figure 1 - Synoptique du processus de mesure

1. Estimation des incertitudes de mesure sur les jaugeages au moulinet

- Comparaison entre la pratique et la norme NF EN ISO 748 « Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts », relevé des écarts ;
- Édition d'une feuille de calcul (Excel) permettant de calculer l'incertitude sur un jaugeage au moulinet en fonction des données d'entrées (nombre de verticales, nombre de points par verticale, incertitudes des moulinets, etc.) selon les normes ISO EN 748 et NF ENV 13005;
- Traitement du cas de plusieurs jaugeages réalisés dans des conditions de répétabilité ;
- Examen du compromis entre une mesure rapide (1 point par verticale) et la densité de points de mesure.

2. Estimation des incertitudes de mesure sur les jaugeages à l'ADCP

- Détection et traitement des valeurs aberrantes ;
- Examen de l'utilisation pour l'ADCP de la feuille de calcul des incertitudes mise en place pour les moulinets ;
- Comparaison ADCP/moulinet.

3. Estimation des incertitudes sur les mesures de niveau d'eau lors des jaugeages

- Estimation des incertitudes liées à la lecture sur site de l'échelle limnimétrique ;
 - Estimation des incertitudes liées au calage des échelles limnimétriques dans le repère NGF ortho ;
 - Combinaison des différentes sources d'incertitude sur les mesures de niveau d'eau ;
 - Détection et traitement des valeurs aberrantes.
4. Estimation des incertitudes sur les mesures de hauteur d'eau en temps réel
- Examen des performances annoncées par les constructeurs d'appareils de mesure de niveau et des capacités de raccordement métrologique ;
 - Combinaison des différentes sources d'incertitude sur les mesures de niveau d'eau ;
5. Estimation des incertitudes sur la construction des courbes hauteur – débit ($Q=f(h)$)
- Construction des courbes à partir de multiples valeurs débit-hauteur issues de jaugeages (avec leurs incertitudes) et incertitude résultante ;
 - Examen des courbes simple et double entrée.
6. Détermination des incertitudes sur les débits issus de la relation $Q=f(h)$
- Incertitudes des débit $Q=f(h)$.

Le présent document porte sur les étapes 3 à 6 uniquement. Les étapes 1 et 2 sont abordées dans le rapport d'étude 2360031 " Estimation des incertitudes de mesure des débits issus d'un jaugeage au moulinet ou à l'ADCP", révision 06 du 15 mars 2005.

L'examen des courbes doubles cité au paragraphe 5 sera traité ultérieurement.

Remarque importante : Pour tous les graphes, tableaux, ou autres figurant dans ce rapport :

- Les hauteurs correspondent à des cotes en « m NGF (ortho) »
- Les cotes indiquées en mètres sont en fait dans le système « m NGF (ortho) »

2. Synthèse

Les objectifs de l'étude faisant l'objet de ce rapport sont :

- Déterminer la loi théorique la plus pertinente pour représenter une relation hauteur-débit pour une section donnée ;
- Déterminer l'incertitude associée à l'estimation du débit obtenu via une relation hauteur-débit et un enregistrement de niveau.

L'exemple concret retenu pour illustrer cette étude est la courbe de transformation hauteur-débit de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600). Pour cette station, des courbes hauteur-débit ont été construites à partir de plusieurs couples de valeurs hauteur-débit issus de jaugeages. Il est rappelé que chaque courbe correspond à une période. L'incertitude globale sur le débit lu sur une courbe à partir d'une mesure au limnimètre a ensuite pu être estimée.

Pour la station de Beaucaire-Tarascon, 28 jaugeages au moulinet (toutes profondeurs et surface) et 80 jaugeages à l'ADCP ont été utilisés. Ils couvrent une période allant de novembre 1992 à décembre 2003 et une plage de débits comprise entre 762 m³/s et 11 051 m³/s.

Au cours de l'étude, la CNR a demandé au CETIAT l'analyse de trois échantillons en particulier :

- **Échantillon n° 1** : Il est obtenu à partir de l'échantillon complet (comportant 108 jaugeages) auquel sont enlevés les jaugeages de cote inférieure à 3 m et les jaugeages reconnus aberrants (jauges ADCP du 10 septembre 2002). Le rapport d'étude CETIAT n° 2360031 a montré que les jaugeages de surface ont une incertitude plus importante que les autres. Les jaugeages de surface redondants avec un jaugeage complet (jauges complètes au moulinet ou jaugeage ADCP) sont donc supprimés. En effet, ils permettent de confirmer la mesure complète au moulinet ou à l'ADCP mais ont une incertitude plus grande. Ils n'apportent donc pas de plus value sur la qualité de l'interpolation. L'échantillon n° 1 compte alors 70 jaugeages.
- **Échantillon n° 2** : cet échantillon comprend tous les jaugeages contenus dans l'échantillon n° 1 jusqu'à janvier 1994 inclus (16 jaugeages) ;
- **Échantillon n° 3** : cet échantillon comprend tous les jaugeages contenus dans l'échantillon n° 1 à partir de mars 1994 inclus (54 jaugeages).

L'échantillon n° 1 a été scindé en deux sous-ensembles (échantillons n° 2 et n° 3) pour tenir compte de l'évolution des lits mineur et majeur à l'aval de Beaucaire au cours de la période couverte par les jaugeages utilisés, soit de novembre 1992 à décembre 2003.

Plusieurs types de loi d'interpolation ont été appliqués à chacun de ces échantillons :

- **Régression linéaire**, de la forme $Q = b \cdot h + a$;
- **Régression polynomiale du second degré**, de la forme $Q = c \cdot h^2 + b \cdot h + a$;
- **Loi puissance**, de la forme $Q = b \cdot h^c$;
- **Loi de Manning-Strickler**, de la forme $Q = b \cdot h^{5/3} + a$.

Après analyse, le choix de la loi d'interpolation à conserver a été guidé par divers paramètres dont le premier est la répartition des **résidus : ceux-ci doivent être répartis de façon aléatoire autour de la valeur moyenne**. Après étude sur le cas de Beaucaire, il s'avère que l'on observe une tendance sur la répartition des résidus pour la régression linéaire et pour la loi en puissance. Ces deux lois sont donc, d'un point de vue statistique, à considérer comme moins satisfaisantes que les deux autres. En revanche, pour la régression polynomiale de degré 2 comme pour la loi Manning-Strickler, la répartition des résidus ne montre pas de tendance marquée. La loi polynomiale est une loi purement mathématique alors que la loi de Manning-Strickler est une loi physique représentative des

écoulements à surface libre en régime permanent. Pour cette raison, **la loi de Manning-Strickler est préférable**, elle est donc **choisie pour l'interpolation de la courbe hauteur-débit de Beaucaire**.

Il est important de noter que le choix de la loi d'interpolation est propre à chaque site. La comparaison des différents types de loi sera à effectuer pour tout autre site qui ferait l'objet d'une étude statistique.

L'étude statistique de la courbe doit être complétée par des éléments rapportés par les expérimentateurs afin que la construction de la courbe et son utilisation soient les plus pertinentes possibles. On notera que des études de terrain ont montré qu'à l'aval de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600), la transition entre le lit mineur et le lit majeur moyen se fait approximativement pour un débit de 7 300 m³/s. Ce débit correspond à un niveau proche de 8,50 m NGF (ortho) au PK 269.600. Ceci conduit à examiner deux domaines distincts : l'un en-dessous de 8,50 m NGF (ortho) et l'autre au-dessus. La distinction de deux domaines pour les trois échantillons a donc été étudiée.

Ainsi, pour l'échantillon n° 1, la loi de Manning-Strickler a été appliquée :

- A l'ensemble de l'échantillon n° 1 ;
- Aux mesures de l'échantillon n° 1 situées en-dessous d'environ 8,50 m NGF (ortho) ;
- Aux mesures de l'échantillon n° 1 situées au-dessus d'environ 8,50 m NGF (ortho).

Les résultats figurent sur le graphique ci-dessous :

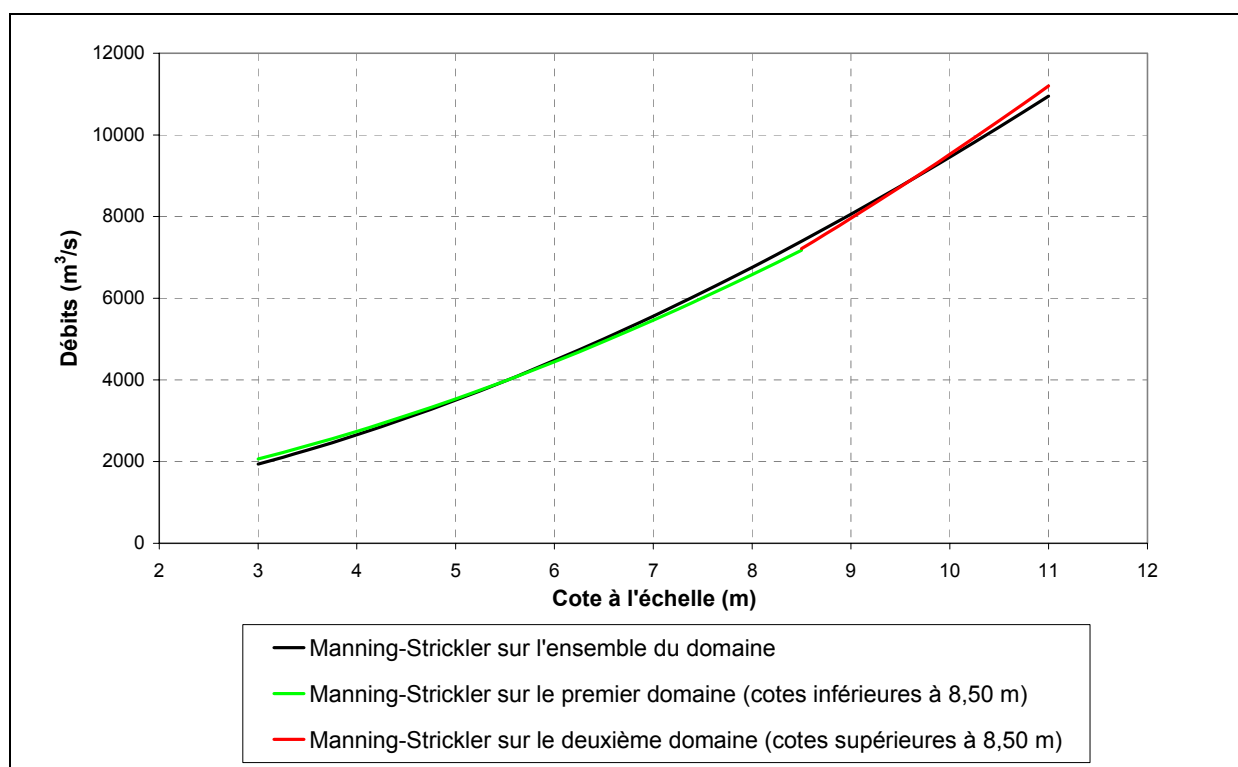


Figure 2 - Beaucaire – Application de la loi de Manning-Strickler à l'échantillon n° 1 (Nov. 1992 – Déc. 2003) sur l'ensemble du domaine et sur chacun des sous-domaines

Diverses observations de terrain montrent un engravement global du lit majeur moyen entre 1974 et 1999 à l'aval de Beaucaire. Ce lit majeur moyen est sollicité pour les hauts débits, qui ont été jaugés pendant les crues de 1993 et 1994 ainsi que pendant celles de 2002 et 2003. Ainsi, la CNR pense que les principales modifications du lit majeur moyen ont certainement eu lieu après de fortes crues, donc après les crues de 1993 et 1994 (dernières fortes crues avant 2002 et 2003). C'est pour cette raison que les échantillons n° 2 et n° 3 ont été construits.

Le même type d'étude que pour l'échantillon n° 1 a été mené sur les échantillons n° 2 et n° 3. On observe que la courbe construite sur le premier domaine (cotes inférieures à 8,50 m) est stable durant l'ensemble de la période (1992 à 2003). **En revanche, sur le deuxième domaine l'écart est important et peut être interprété comme une évolution de la courbe au cours du temps** (figure 3).

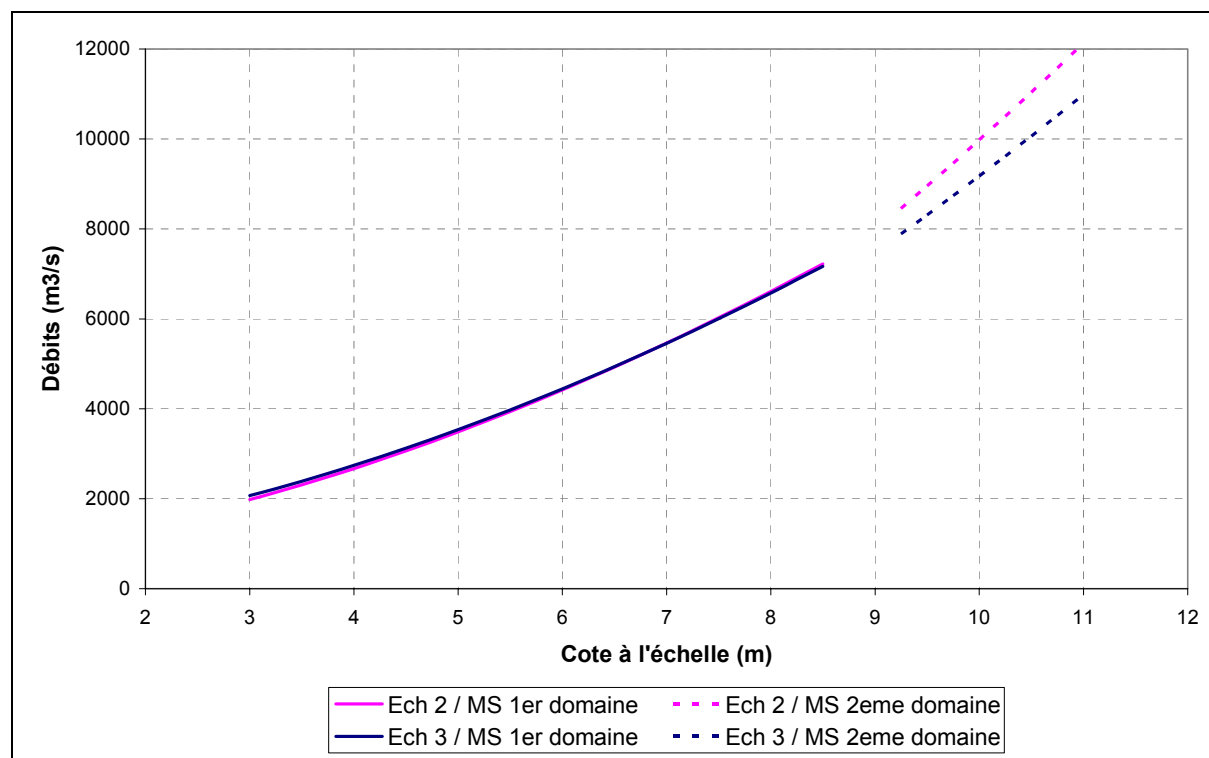


Figure 3 – Beaucaire – Application de la loi de Manning-Strickler (MS) aux échantillons n° 2 et n° 3 sur chacun des deux sous-domaines

La figure 3 montre que pour les cotes supérieures à 8,50 m, l'écart entre les courbes augmente avec la valeur de la cote à l'échelle. L'influence sur le débit prédit pour une même cote est donc maximal à la valeur maximale de la cote à l'échelle. Le tableau 1 indique les valeurs de débit prédites en fonction du modèle choisi et du domaine choisi pour la valeur maximale enregistrée au cours de la période à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600).

Tableau 1 - Valeurs de débits (m³/s) estimées pour 11,3 m NGF (ortho) à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600)

	Modèle polynomial degré 2 Domaine complet (m³/s)	Modèle Puissance Domaine complet (m³/s)	Modèle Manning- Strickler Domaine complet (m³/s)	Modèle Manning- Strickler (domaine > 8,5 m) (m³/s)
Echantillon n°1	11 643	10 801	11 419	11 722
Echantillon n°2	12 564	11 622	12 186	12 800
Echantillon n°3	11 277	10 585	11 155	11 554

Les calculs d'incertitudes ont été menés sur ces trois échantillons. L'incertitude globale est la combinaison de trois composantes d'incertitude qui sont :

- Incertitude liée aux jaugeages qui servent de référence pour la construction de la courbe (cf. Rapport d'étude n° 2360031 – Estimation des incertitudes de mesure des débits issus d'un jaugeage au moulinet ou à l'ADCP) ;
- Incertitude liée à la qualité de l'interpolation : elle résulte des écarts entre les valeurs de référence (jaugeages) et la courbe construite en choisissant une certaine loi d'interpolation ;
- Incertitude liée à la lecture de la courbe : elle résulte de la pente locale de la courbe et de l'incertitude sur la mesure de niveau.

Pour chaque courbe obtenue, il est possible de déterminer l'incertitude associée à la valeur de débit prédite. Il a été montré une évolution de la courbe dans le temps pour les cotes supérieures à 8,5 m, l'incertitude estimée sur l'échantillon n° 1 intègre donc la dérive de la courbe au cours de la période considérée. Les incertitudes estimées sur les échantillons n° 2 et n° 3 n'intègrent pas cette dérive et conduisent à des valeurs d'incertitude plus faibles.

Les valeurs maximales calculées figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 - Incertitudes estimées

	U(Q _{lu}) maximale sur domaine complet (k=2)	U(Q _{lu}) sur domaine < 8,5 m (k=2)	U(Q _{lu}) sur domaine > 8,5 m (k=2)
Echantillon n° 1	13,5%	13,5%	13,5%
Echantillon n° 2	13,7%	12,5%	10,7%
Echantillon n° 3	11,4%	12,2%	6,0 %

Pour l'échantillon n° 1 (novembre 1992 à décembre 2003), l'incertitude maximale sur le débit lu sur la courbe est de $\pm 13,5 \%$, quelque soit le domaine considéré. Cette valeur pourra être arrondie à $\pm 14 \%$.

Pour l'échantillon n° 2 (novembre 1992 à janvier 1994), l'incertitude maximale sur le débit lu sur la courbe est du même ordre de grandeur que celle de l'échantillon n° 1 lorsque l'on considère l'ensemble du domaine. En revanche, la valeur est légèrement plus faible pour chaque domaine séparément (cotes soit inférieures soit supérieures à 8,50 m). On notera cependant que dans les hauts débits, l'incertitude est plus faible que dans les bas débits, ce qui est à considérer avec prudence d'un point de vue hydrométrique. Après analyse des données, cette valeur plus basse s'explique par le nombre de points utilisés pour faire l'interpolation sur le deuxième domaine : ces points sont à la fois peu nombreux et issus de jaugeages réalisés sur une courte période (octobre 1993 et janvier 1994 pour le deuxième domaine).

Pour l'échantillon n° 3 (mars 1994 à décembre 2003), quelque soit le domaine considéré, l'incertitude est plus faible que pour les autres échantillons. On notera que pour le deuxième domaine (cotes supérieures à 8,50 m), l'incertitude sur le débit lu sur la courbe est seulement de $\pm 6 \%$, ce qui est à considérer avec prudence d'un point de vue hydrométrique. De même que pour l'échantillon n° 2, cette faible valeur de l'incertitude s'explique par un nombre réduit de points, issus de jaugeages réalisés sur une courte période (novembre 2002 et décembre 2003).

En conclusion,

La présente étude met en évidence que la loi la plus adaptée pour la courbe hydrométrique de Beaucaire-Tarascon est celle de Manning-Strickler, en distinguant deux domaines :

- L'un pour les cotes inférieures à 8,50 m NGF (ortho) ;
- L'autre pour les cotes supérieures à 8,50 m NGF (ortho).

Par ailleurs, une évolution de la courbe au cours de la période (novembre 1992 à décembre 2003) a été mise en évidence ; les jaugeages considérés sont donc associés à des caractéristiques géométriques qui ont évolué (évolution du lit majeur moyen à l'aval de la station).

- L'incertitude obtenue sur les débits prédits par la courbe de Manning-Strickler établie à partir de l'échantillon n° 1 (période Nov. 1992 – Déc. 2003) est de $\pm 14 \%$ sur l'ensemble du domaine. Cette valeur intègre la dérive de la courbe au cours de la période considérée.
- Il peut être pertinent de considérer une période plus courte, qui doit logiquement conduire à une incertitude plus faible. Cependant, la réduction de la taille de l'échantillon réduit la fiabilité de la valeur d'incertitude estimée. Ainsi, on peut conclure que l'incertitude sera comprise entre une limite basse de l'ordre de $\pm 6 \%$ et la limite haute de $\pm 14 \%$. Entre ces deux limites, une valeur réaliste de l'incertitude est de l'ordre de $\pm 10 \%$ à $\pm 12 \%$ (voir tableau 2), valeur qui pourra être précisée par l'intégration des jaugeages futurs.

Pour le gestionnaire, deux choix sont possibles :

- Utiliser la courbe de l'échantillon n° 1 sur le domaine complet, avec une incertitude de $\pm 14 \%$.
- Utiliser les courbes par domaine de l'échantillon n° 3, avec une incertitude de $\pm 10 \%$ à $\pm 12 \%$.

3. Description de la méthode générale (approche métrologique)

D'une manière générale, l'incertitude de mesure des débits lus sur une courbe résulte de trois composantes, détaillées dans les paragraphes ci-après :

- Incertitude sur les points à partir desquels la courbe est établie, c'est à dire les couples de valeurs $\{h, Q\}$ obtenues lors des jaugeages (par la suite, ces valeurs seront qualifiées de valeurs "de référence") ;
- incertitude sur la qualité de l'interpolation entre les points ;
- incertitude sur la valeur de hauteur lue (cote à l'échelle).

Ces trois composantes sont détaillées ci-dessous. La combinaison de ces trois composantes est réalisée selon les méthodes décrites dans la norme NF ENV 13005 "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure", en appliquant la loi de propagation des incertitudes. Cette loi demande de quantifier les incertitudes-types associées à chacune des composantes.

La méthode présentée ici est une méthode classique en métrologie, utilisée pour l'estimation des incertitudes d'étalonnage des instruments, lors de l'utilisation des instruments ou encore pour l'estimation des incertitudes associées à des valeurs tabulées ou à des propriétés physiques (par ex, la masse volumique de l'eau en fonction de la température). Cette méthode s'applique à un ensemble de couples de valeurs de référence dont on connaît les incertitudes, après élimination des valeurs reconnues aberrantes.

3.1. Incertitudes sur les valeurs de référence (débits jaugés)

La composante d'incertitude des valeurs de référence est liée aux incertitudes des jaugeages. Ces derniers peuvent être réalisés par la méthode au moulinet ou par l'ADCP. L'étude faisant l'objet du rapport n° 2360031 «Estimation des incertitudes de mesure des débits issus d'un jaugeage au moulinet ou à l'ADCP» montre que les incertitudes de mesure des jaugeages (au moulinet comme à l'ADCP) sont proportionnelles à la valeur de débit (elles s'expriment en %), avec des valeurs comprises généralement entre $\pm 5 \%$ et $\pm 10 \%$ selon la méthode employée (ADCP, jaugeage en six points par verticale, jaugeage en surface, etc). La figure ci-dessous illustre cette composante d'incertitude de manière qualitative.

Il existe également une incertitude de mesure associée à la cote à l'échelle. Celle-ci est négligeable devant l'incertitude associée au débit.

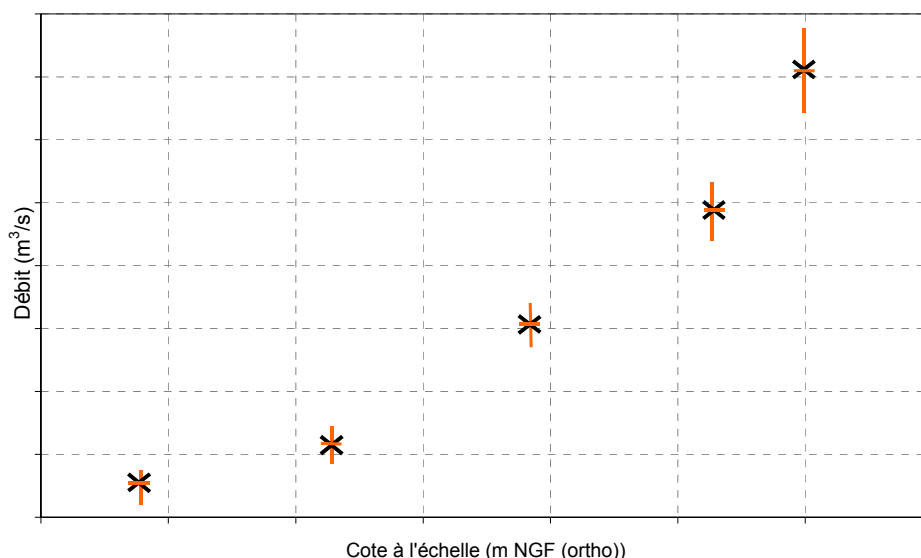


Figure 4 - Composante d'incertitude des valeurs de référence

L'information nécessaire pour quantifier l'incertitude-type associée à cette composante est la valeur de l'incertitude élargie associée à chaque valeur de débit. Les valeurs de débit étant issues d'un processus de mesure complexe, on dispose de la valeur de l'incertitude élargie (souvent avec un coefficient $k = 2$, par convention, ce qui correspond à un niveau de confiance de 95 %) et l'on choisira une loi de distribution gaussienne :

$$u(Q_i) = \frac{U(Q_i)}{2} \quad (1)$$

Les valeurs de référence peuvent être regroupées en plusieurs domaines, par exemple selon les méthodes de mesure ou les domaines de fonctionnement hydraulique. En tout état de cause, les valeurs reconnues aberrantes (par exemple pour des raisons de conditions de mesure particulières, etc.) seront éliminées de l'échantillon de référence.

Sur la figure 4 par exemple, on pourrait éliminer la valeur cerclée de rouge, après l'avoir déclarée aberrante au vu de l'analyse des conditions expérimentales, et distinguer deux domaines de fonctionnement différent (accolades bleues).

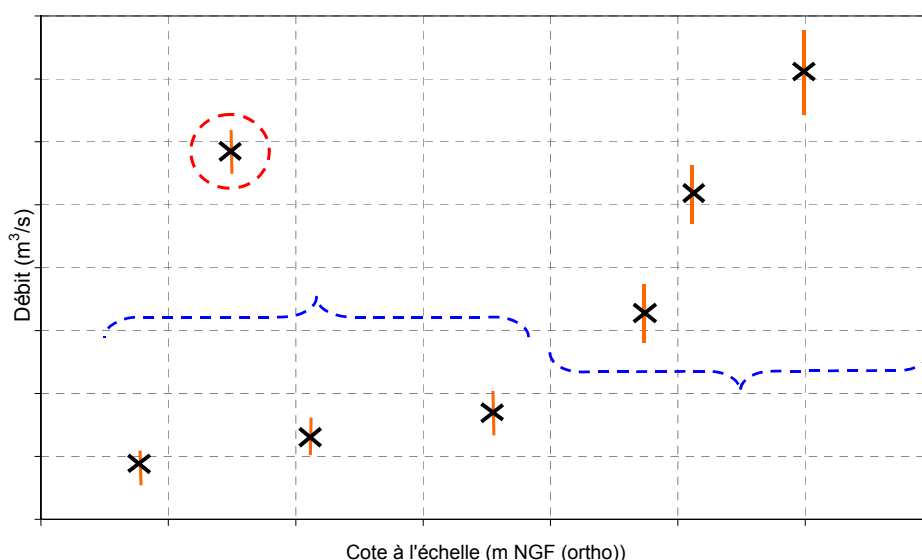


Figure 5 - Distinction de plusieurs domaines

3.2. Construction de la courbe d'interpolation

3.2.1. Introduction

La construction de la courbe est nécessairement réalisée après le choix de l'échantillon (élimination des valeurs aberrantes, distinction de plusieurs domaines, etc.).

L'interpolation peut être construite manuellement ou à l'aide d'une régression linéaire. Dans les deux cas, il existe une composante d'incertitude liée à la qualité de l'interpolation, c'est-à-dire liée à l'adéquation entre les valeurs de référence et la loi d'interpolation choisie. Dans le cas d'un ajustement manuel, cette composante peut être estimée en considérant les écarts entre la valeur donnée par la courbe, tracée manuellement, et la valeur de référence pour une même abscisse. Dans le cas d'une régression, la méthode est présentée dans le paragraphe 3.2.2.

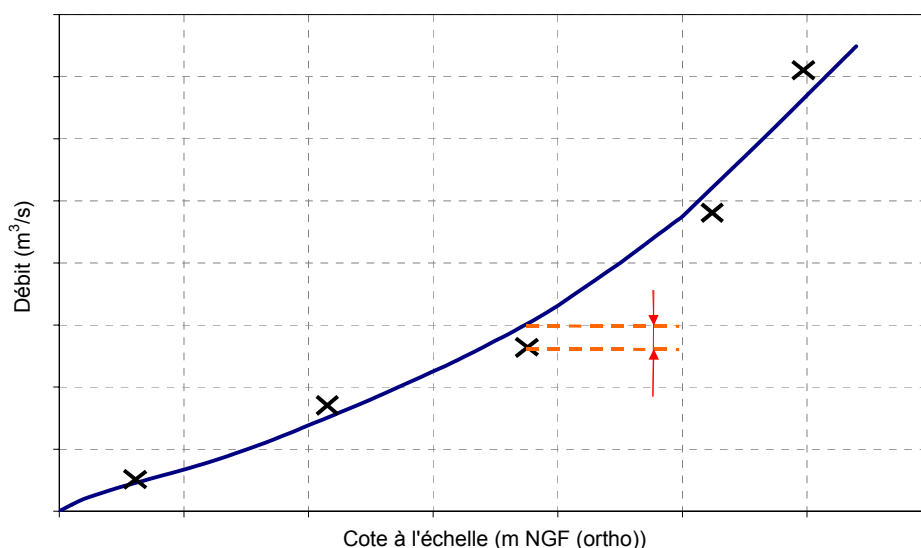


Figure 6 - Composante d'incertitude de qualité de l'interpolation

A partir d'une courbe tracée manuellement, il peut être pertinent de numériser les valeurs puis de déterminer une équation mathématique permettant de représenter l'ensemble de la courbe sur un domaine. En effet, la représentation mathématique permet de déterminer avec plus de facilité la pente de la courbe, nécessaire au paragraphe 3.3.

3.2.2. Construction de la courbe d'interpolation par ajustement aux moindres carrés

La courbe peut également être construite par régression linéaire¹ (méthode des moindres carrés), méthode qui minimise la distance entre les points et la courbe. La construction de la courbe par ajustement aux moindres carrés doit tenir compte de la qualité de la connaissance de chacun des points de référence. Les incertitudes des jaugeages sont différentes pour chaque valeur de débit, pour deux raisons :

- en première approche, les incertitudes sont proportionnelles au débit. Les valeurs d'incertitude exprimées en valeurs naturelles sont donc très différentes pour les bas débits et pour les hauts débits ;
- pour l'application CNR : sur un site donné, les jaugeages ne sont pas tous effectués selon la même méthode de mesure (jaugeages à l'ADCP ou au moulinet, avec un nombre de verticales et de points par verticale qui peuvent être différents en fonction des conditions de réalisation du jaugeage)

Ainsi, pour obtenir l'équation mathématique de la courbe par une régression linéaire, il est possible d'utiliser une méthode d'ajustement aux moindres carrés **pondérés**². Cette méthode d'ajustement pondère chaque point par l'incertitude associée. Si le modèle est une droite, il est possible de passer par une transformation logarithmique, mais cette méthode n'est pas applicable au cas des jaugeages (les courbes obtenues ne sont pas des droites). Pour un polynôme de degré 2, les paramètres de la courbe ajustée par la méthode des moindres carrés pondérés peuvent être calculés à partir des paramètres obtenus par la méthode des moindres carrés.

¹ Référence : *Modélisation et estimation des erreurs de mesure*, M. Neuilly, CETAMA, 2^{ème} éd., 1998

²La méthode des moindres carrés repose sur l'hypothèse d'homoscédasticité (toutes les valeurs ont la même incertitude), la méthode des moindres carrés pondérés doit être utilisée si cette hypothèse n'est pas respectée.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse porte prioritairement sur le choix de la loi (linéaire, polynomiale ou exponentielle). L'influence de la prise en compte de la pondération par les incertitudes n'est pas traitée.

Par comparaison à la méthode manuelle de construction, qui conduit à une représentation graphique uniquement, la méthode des moindres carrés (pondérés ou non, avec une loi linéaire, polynomiale ou exponentielle) donne une représentation mathématique de l'ensemble des valeurs. Cependant, ces deux méthodes ne permettent en aucun cas d'établir la loi physique qui relie éventuellement les valeurs entre elles. L'établissement de la loi physique, si elle existe, doit s'appuyer sur la connaissance physique des phénomènes en jeu et des changements de comportement liés à des changements de conditions. Les changements de condition peuvent être, dans le cadre de cette étude, des changements dans la géométrie ou dans la nature de l'écoulement.

Si la courbe est obtenue par une régression, il est possible d'estimer la qualité de l'interpolation en s'appuyant sur les paramètres de la régression. En effet, les erreurs associées à chacun des paramètres peuvent être calculées, et il est possible d'en déduire les incertitudes-types associées. Cependant, les paramètres de la régression sont corrélés et il est absolument nécessaire de tenir compte de cette corrélation. La prise en compte de ces corrélations demande des développements mathématiques lourds et conduit à des valeurs très proches des valeurs obtenues par l'analyse des résidus. En pratique, il est souvent plus rapide de procéder comme dans le cas des interpolations par méthode manuelle, c'est à dire en considérant les écarts entre la valeur donnée par la courbe et la valeur de référence pour une même abscisse (analyse des résidus). Cette méthode présente par ailleurs l'avantage d'être rapidement fonctionnelle quel que soit le type d'interpolation (linéaire, polynomiale, exponentielle, etc.).

Suivant le nombre de résidus disponible, il est possible de choisir une de ces deux méthodes :

- Nombre de résidus inférieur à 10 : l'incertitude-type associée à la qualité de l'interpolation est estimée à partir de la valeur maximale des résidus et d'une loi de distribution rectangulaire (d'où le coefficient $\sqrt{3}$, norme NF ENV 13005) :

$$u_{\text{lissage}} = \frac{\max(\text{résidus})}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

- Nombre de résidus supérieur à 10 : l'incertitude-type associée à la qualité de l'interpolation est estimée à partir de l'écart-type des résidus :

$$u_{\text{lissage}} = \sigma(\text{résidus}) \quad (3)$$

Qu'elle soit obtenue par une méthode manuelle ou par une régression aux moindres carrés (pondérés ou non, et quel que soit le type de loi choisi) :

- la courbe construite présente des incertitudes nécessairement supérieures aux incertitudes de chacun des points ayant servi à sa construction³,
- la qualité de l'interpolation n'est pas liée à la méthode choisie (manuelle ou régression), mais à la manière d'appliquer la méthode choisie et à l'expérience de l'opérateur (dans le cas d'une méthode manuelle comme dans le cas d'une régression),
- la qualité de l'interpolation peut être estimée dans tous les cas par une méthode unique, basée sur les écarts entre la courbe et les valeurs de référence.

³ Si un point unique présente une incertitude très nettement supérieure aux autres points, il convient de se demander si ce point est à conserver dans l'échantillon. De même, il peut être pertinent de considérer plusieurs domaines en fonction des incertitudes.

3.2.3. Préconisations sur le choix de la loi dans le cas général

Comme on le verra dans l'exemple de Beaucaire, le choix de la loi et le choix de l'échantillon sont tout aussi importants

Pour chaque site et pour chaque échantillon, il sera nécessaire de comparer les différentes lois, en s'appuyant sur les préconisations suivantes :

- Construire et comparer les polynômes de degré 1, 2, etc.. jusqu'à l'obtention d'une distribution aléatoire des résidus ;
- Construire le modèle puissance et observer la répartition des résidus ;
- Construire le modèle de Manning-Strickler et observer la répartition des résidus ;
- Comparer le modèle de Manning-Strickler, le modèle puissance et les polynômes et choisir le modèle en fonction des besoins.

3.3. Lecture de la courbe

3.3.1. Introduction

La composante d'incertitude de lecture de la courbe est liée l'incertitude des mesures de cote à l'échelle à partir desquelles le débit est calculé (et non l'incertitude sur la cote à l'échelle des points de référence). Cette composante est estimée sur l'axe des abscisses, et reportée sur l'axe des ordonnées en tenant compte de la pente locale de la courbe. Si l'équation de la courbe est connue, alors la pente locale est obtenue par dérivation de l'équation représentative de la courbe. L'incertitude-type associée est alors :

$$u_{lecture}(h) = \frac{\partial Q}{\partial h} \cdot u(h) \quad (4)$$

avec

$u(h)$ est l'incertitude-type associée à la mesure de la cote à l'échelle h

$\frac{\partial Q}{\partial h}$ est la pente locale de la courbe, également appelée coefficient de sensibilité

Si l'équation de la courbe n'est pas connue, la pente de la courbe $\frac{\partial Q}{\partial h}$ peut être approchée par $\frac{\Delta Q}{\Delta h}$:
rapport d'une petite variation de débit ΔQ sur une petite variation de cote à l'échelle Δh .

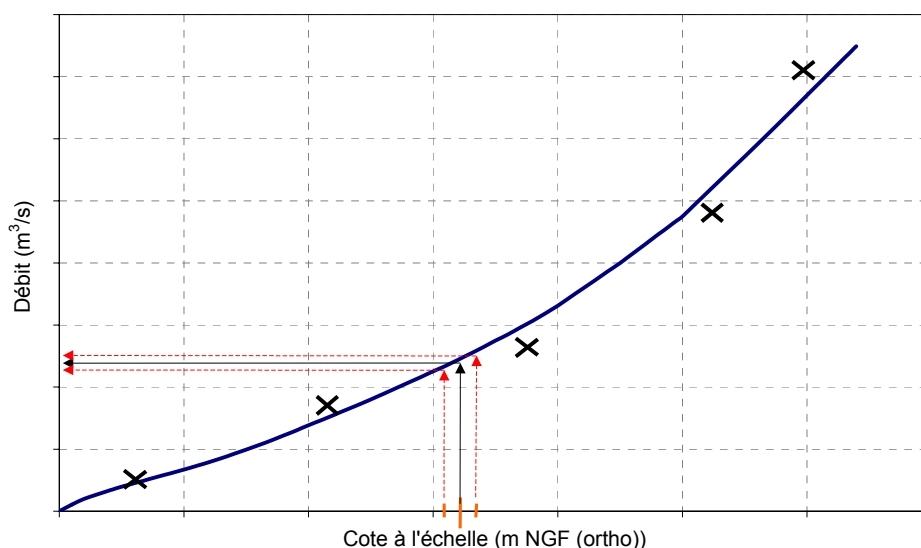


Figure 7 - Composante d'incertitude de la valeur de cote à l'échelle

3.3.2. Estimation des incertitudes sur les mesures de niveau d'eau

Pour déterminer le débit à partir des courbes, le niveau peut être déterminé à partir d'une mesure automatique du niveau (limnimètre par exemple) ou à partir d'une lecture à l'échelle. Dans les deux cas, une incertitude est associée à la mesure du niveau, incertitude qui se répercute sur le débit lu (voir paragraphe 3.3). Pour déterminer l'incertitude associée au débit lu sur la courbe, il est donc nécessaire d'estimer l'incertitude associée à la mesure du niveau. Cette estimation d'incertitude s'appuie sur le cas de la station limnimétrique Beaucaire PK 269.600.

Les niveaux sont mesurés par des capteurs munis d'une centrale d'acquisition. Le contrôle de ces instruments est réalisé par le fournisseur lors de l'achat, puis un suivi est réalisé sur site par la CNR, par comparaison aux échelles limnimétriques de référence. L'incertitude de mesure des niveaux est donc liée à la connaissance de l'incertitude associée aux lectures d'échelle. De manière générale, les capteurs et l'échelle sont placés à quelques mètres de distance.

3.3.2.1. Positionnement des échelles limnimétriques

Lorsque les échelles limnimétriques sont placées en berge, elles sont généralement mises en place sur des blocs solidaires de béton armé. Deux composantes d'erreur sont à analyser :

- Le calage du zéro est réalisé par des opérateurs topographes, avec une incertitude estimée à quelques centimètres près. Les lectures étant ramenées en repère NGF et le limnimètre étant calé sur l'échelle, ils sont dans le même référentiel, cette composante n'a pas d'influence sur les débits.
- L'échelle est composée d'une suite de différents éléments. La continuité de cette échelle est contrôlée lors des relevés topo, avec une incertitude de vérification estimée à environ $\pm 0,01$ m. Cette vérification met en évidence une différence de continuité qui peut être évaluée à $\pm 0,05$ m.

3.3.2.2. Dérive des échelles limnimétriques

Le calage des échelles dans le repère NGF (orthométrique) est réalisé périodiquement (5 ans) ou sur demande des opérateurs, après détection d'un écart important, à l'aide d'un relevé topo. Entre deux vérifications topo, il n'est pas exclu que des modifications lentes des berges entraînent une dérive de l'échelle. Les échelles étant comparées aux limnimètres lors de chaque contrôle, le résultat de cette

comparaison peut permettre de détecter une dérive éventuelle de l'échelle. L'étude doit donc être réalisée pour chaque site (cas de Beaucaire traité au paragraphe 4.3.1).

3.3.2.3. Lecture des échelles limnimétriques

La résolution des échelles est de 5 cm. Cependant, les opérateurs sont capables d'interpoler la lecture à 1/5 de la graduation (soit 1 cm). Malgré tout, en raison des conditions de mesure (batillage, lisibilité de l'échelle par l'opérateur, etc), l'incertitude de lecture est supérieure à la résolution de lecture des opérateurs. Cette composante d'incertitude est très fortement liée à l'expérience des opérateurs et aux conditions de mesure, et peut être estimée à partir des comparaisons entre le limnimètre et l'échelle : en effet, à l'issue de ces comparaisons, les opérateurs ne règlent le limnimètre que s'ils estiment que la lecture d'échelle ne présente pas une incertitude trop importante.

Les procédures de la CNR mentionnent que le recalage ne doit pas être effectué si l'écart est inférieur à 2 cm (inclus). Comme pour la dérive des échelles, l'étude doit être réalisée pour chaque site (cas de Beaucaire traité au paragraphe 4.3.1).

3.3.2.4. Mesure du niveau au limnimètre

- Performances de l'instrumentation

Les mesures automatiques de niveau d'eau sont réalisées avec des limnimètres type « bulle à bulle », dont les documents fournis par les constructeurs indiquent une « précision » de l'ordre de ± 1 cm. Il n'est pas mentionné dans les fiches du constructeur comment cette valeur est évaluée, de sorte que l'incertitude-type associée sera estimée en considérant que c'est une valeur d'erreur maximale ("EMT" : "Erreur Maximale Tolérée"), en lui associant une loi de distribution rectangulaire :

$$u_{EMT}(h) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \text{ (en m)} \quad (5)$$

Cette erreur maximale ne tient pas compte de la dérive dans le temps de l'appareil ou de l'influence des conditions de site.

- Dérive⁴ dans le temps

Le suivi dans le temps peut être déterminé en s'appuyant sur les fiches de contrôle des stations. En effet, lors de chaque contrôle (en moyenne, un par trimestre), le niveau enregistré par le capteur est comparé à la lecture d'échelle et un réglage de l'appareil est réalisé si l'écart est significatif (en fonction des conditions de mesure – batillage par exemple – le réglage sera effectué ou non). Cette opération de comparaison de la réponse du capteur à la cote à l'échelle s'apparente à un étalonnage, avec deux différences importantes par rapport à un étalonnage en laboratoire :

- Les incertitudes associées aux valeurs de la cote à l'échelle, qui sert de référence, ne sont pas très bien connues et, en fonction des conditions de mesure, peuvent être plus importantes que celles de l'instrument ;
- Lors du contrôle, la valeur de niveau n'est pas choisie par l'opérateur (elle dépend des conditions hydrologiques du moment). Or, la dérive de l'instrument peut être différente en fonction du niveau mesuré, il est donc nécessaire de conduire une analyse de la dérive tenant compte de ce facteur, en définissant arbitrairement une période de référence (ici, une période d'un an est choisie).

En tenant compte de ces deux points, on peut estimer que le suivi sur site de la dérive du limnimètre ne correspond pas uniquement à une évolution des performances du capteur dans le temps, mais

⁴ Tel que défini dans le Vocabulaire International de Métrologie et tel qu'il est quantifié selon la norme NF ENV 13005, le terme de « dérive » n'implique pas une variation lente et toujours de même sens, mais regroupe l'ensemble des erreurs mises en évidence par un suivi de l'instrument dans le temps.

intègre également une part due à la lecture de l'échelle (notamment en présence de batillage ou en période de crue), ainsi qu'à une éventuelle dérive de l'échelle elle-même.

- Incertitude associée au limnimètre

La dérive, telle qu'elle est estimée ci-dessus, prend en compte les conditions de comparaison entre l'échelle et le limnimètre, donc elle intègre des composantes de reproductibilité de la mesure. Ainsi, une estimation raisonnable de l'incertitude associée aux mesures de niveau peut être réalisée en combinant uniquement les deux composantes déterminées ci-dessus, d'où l'incertitude-type :

$$u(h) = \sqrt{u_{EMT}^2(h) + u_{dérive}^2(h)} \quad (6)$$

L'application numérique est réalisée pour le cas de Beaucaire au paragraphe 4.3.1.

3.4. Combinaison des trois composantes

Les trois composantes sont représentées sur la figure ci-après. Ces trois composantes sont estimées séparément, et l'on peut remarquer les points suivants :

- L'incertitude des valeurs de référence n'est pas nécessairement constante sur l'ensemble du domaine concerné ;
- L'incertitude de construction de la courbe est estimée globalement sur l'ensemble d'un domaine, elle a donc une valeur unique sur chaque domaine considéré ;
- L'incertitude de lecture est liée à l'incertitude des moyens de mesure de la grandeur portée en abscisse, qui n'est pas nécessairement constante. D'autre part, cette incertitude de lecture est affectée d'un coefficient de sensibilité lié à la pente de la courbe, qui elle non plus n'est pas constante dans le cas général (elle n'est constante que dans le cas d'une droite).

La combinaison des trois composantes d'incertitude est réalisée selon la relation suivante :

$$u^2(Q) = u^2(Q_i) + u_{lissage}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot u(h) \right)^2 \quad (7)$$

où :

- (a) $u(Q_i)$ est l'incertitude-type des valeurs de référence servant à construire la courbe (incertitude associée aux jaugeages dans le cas présent)
- (b) $u_{lissage}$ est l'incertitude-type associée à l'interpolation
- (c) $\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot u(h)$ est l'incertitude-type de lecture des cotes à l'échelle (niveaux), multipliée par la pente de la courbe $Q=f(h)$.

Les trois composantes d'incertitude (a), (b) et (c) sont représentées sur la figure ci-dessous :

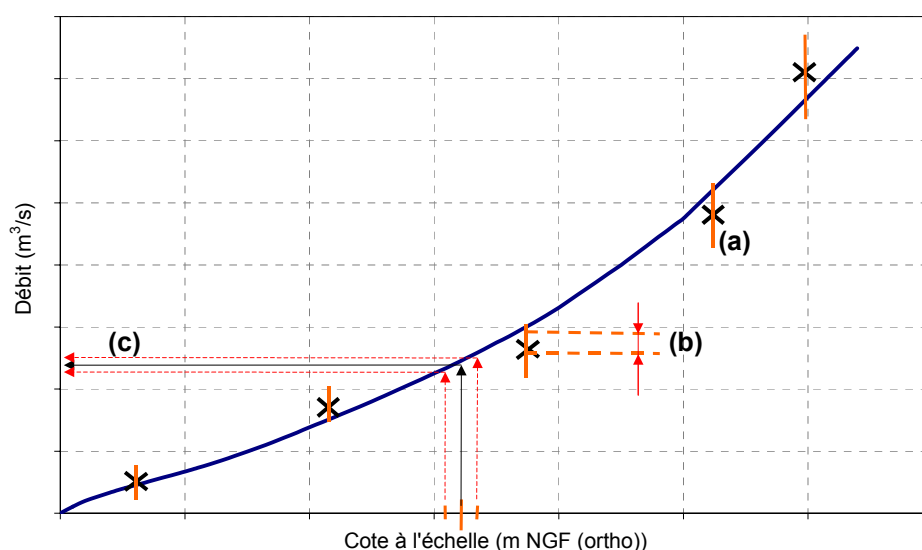


Figure 8 - Combinaison des trois composantes

En conclusion, la combinaison de ces trois composantes conduit à une incertitude qui est nécessairement supérieure à l'incertitude des valeurs de référence qui sont servi à construire la courbe, et qui doit être calculée en chacun des points. Dans le cas général, elle n'est pas constante sur l'ensemble du domaine considéré et la valeur maximale est retenue comme incertitude associée à l'utilisation de la courbe. Dans certains cas, les incertitudes associées aux valeurs de référence sont très différentes (ex. incertitudes ADCP et incertitudes de jaugeage en surface) ; il est alors possible de considérer une courbe unique, avec des incertitudes différentes par tronçon.

Pour certaines applications, il peut être intéressant de découper le domaine en sous-domaines sur lesquels on considère que l'incertitude est constante.

• Redondance des composantes

Dans certains cas, la composante d'incertitude associée aux valeurs de référence ($u(Q_i)$) et la composante d'incertitude de modélisation (u_{lissage}) sont partiellement ou totalement redondantes, et il conviendra alors dans l'établissement du bilan des incertitudes d'en tenir compte afin de ne pas augmenter artificiellement l'incertitude composée. Pour ne comptabiliser qu'une de ces deux composantes, il est nécessaire d'établir clairement qu'il y a redondance totale. Celle-ci sera démontrée si la totalité des points suivants sont établis :

- Condition 1 : les valeurs de référence sont établies en conditions de reproductibilité⁵, avec des instruments de mesure différents, de sorte que l'on puisse penser qu'il n'y a pas de biais commun à l'ensemble des valeurs de référence (ce n'est pas le cas lors de l'établissement d'une courbe d'étalonnage, où toutes les valeurs de référence sont obtenues par comparaison au même étalon, donc susceptibles de présenter un biais commun) ;
- Condition 2 : la modélisation s'appuie sur une loi physique clairement établie par ailleurs ;
- Condition 3 : les incertitudes associées aux valeurs de référence et les résidus de la modélisation sont du même ordre de grandeur (ce qui indique que les incertitudes associées aux valeurs de référence ne sont pas sous-estimées).

Si ces trois conditions sont remplies, on pourra considérer que la composante d'incertitude associée aux valeurs de référence et la composante d'incertitude de modélisation sont totalement redondantes,

⁵ Les conditions de reproductibilité supposent que le mesurande reste le même, donc excluent une évolution des conditions aux limites (stabilité du profil, conditions hydrauliques aval identiques, etc.)

et l'on n'en comptera qu'une dans le bilan des incertitudes (si les trois conditions ci-dessus sont remplies, les deux composantes concernées sont de même ordre de grandeur, donc on pourra utiliser l'une ou l'autre dans le calcul).

Ce cas est exceptionnel ; dans le cas général, les trois conditions ne sont pas remplies (bien souvent, aucune des trois n'est remplie) et il convient alors de prendre en compte distinctement les deux composantes d'incertitude concernées.

Cependant, le cas des courbes de jaugeages (telles qu'elles sont réalisées par la CNR) peut remplir ces trois conditions, dans un cas bien spécifique :

- La condition 1 peut être remplie puisque les valeurs de référence sont établies avec des jaugeages réalisés avec des moulinets et ADCP différents, sur plusieurs années (donc en conditions de reproductibilité) ;
- La condition 2 peut être remplie si l'on utilise une modélisation s'appuyant sur la loi de Manning-Strickler (en ayant démontré par ailleurs que cette loi est applicable aux conditions du site) ;
- La condition 3 peut être remplie si les incertitudes associées aux valeurs de référence et les résidus de la modélisation sont du même ordre de grandeur

On note ici que la démonstration de la redondance des composantes d'incertitude ne peut être démontrée qu'en ayant réalisé la modélisation et estimé les résidus.

Dans le cas où il n'est pas possible de démontrer que les trois conditions sont remplies, on ne peut pas considérer qu'il y a redondance totale et toutes les composantes d'incertitude seront prises en compte, même si une redondance partielle entre elles peut être mise en évidence.

4. Application à l'exemple de Beaucaire - Examen d'une courbe simple

L'examen des incertitudes de construction et d'utilisation des courbes, dans le cas d'une courbe simple, s'appuie sur l'exemple de Beaucaire (les données utilisées figurent en ANNEXE 1).

4.1. Qualification des mesures et incertitudes associées aux valeurs expérimentales

Les jaugeages réalisés sur le site de Beaucaire, utilisés dans le cadre de cette étude, couvrent une période de 11 années (de novembre 1992 à décembre 2003). Sur cette période, deux méthodes de mesure ont été utilisées : jaugeages au moulinet d'une part et jaugeages à l'ADCP d'autre part. Les jaugeages au moulinet sont des jaugeages complets (jaugeages toutes profondeurs) ou des jaugeages de surface. Les jaugeages à l'ADCP ont été réalisés avec plusieurs modèles (600, 1200 kHz).

L'échantillon complet est représenté ci-dessous :

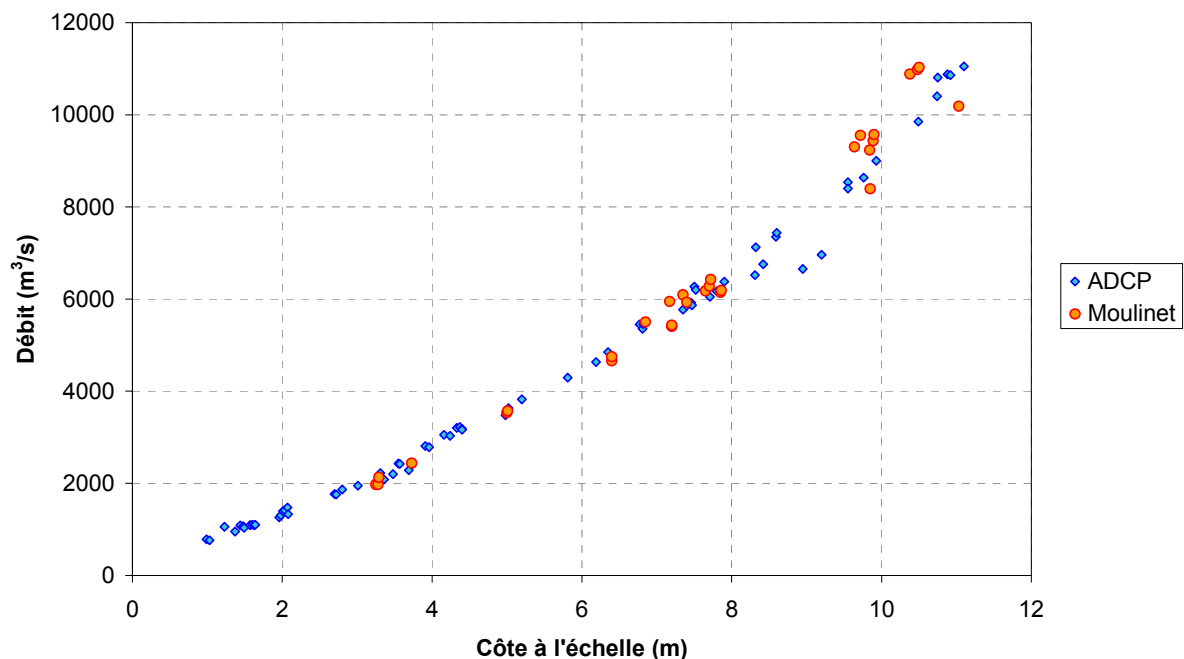


Figure 9 - Beaucaire – Échantillon complet (novembre 1992 à décembre 2003)

Avant de déterminer les paramètres de la courbe, il est important de qualifier le fichier de données, c'est à dire examiner si certaines valeurs qui paraissent suspectes - car éloignées du nuage de points - sont susceptibles d'être aberrantes. En effet, des valeurs reconnues aberrantes devraient être exclues de l'échantillon. Pour ce faire, la première étape consiste à représenter les incertitudes associées à chaque valeur expérimentale.

Par ailleurs, une valeur d'incertitude est associée à chaque valeur de débit, en tenant compte du mode opératoire et des résultats mentionnés dans le rapport d'étude CETIAT n° 2360031. Cette étude indique des valeurs d'incertitude minimale pour chaque méthode de jaugeage. En accord avec les

expérimentateurs, nous considérons ici les valeurs d'incertitude suivantes (incertitudes élargies avec un facteur d'élargissement $k = 2$, ce qui correspond à un niveau de confiance de 95%) :

- Jaugeage au moulinet, complet (standard) : $\pm 7 \%$
- Jaugeage au moulinet, complet, avec débordement⁶ : $\pm 8 \%$
- Jaugeage au moulinet, surface⁷ : $\pm 10 \%$
- Jaugeage ADCP : $\pm 5 \%$

La représentation de l'échantillon avec les incertitudes associées à chacun des points conduit à la figure suivante⁸ :

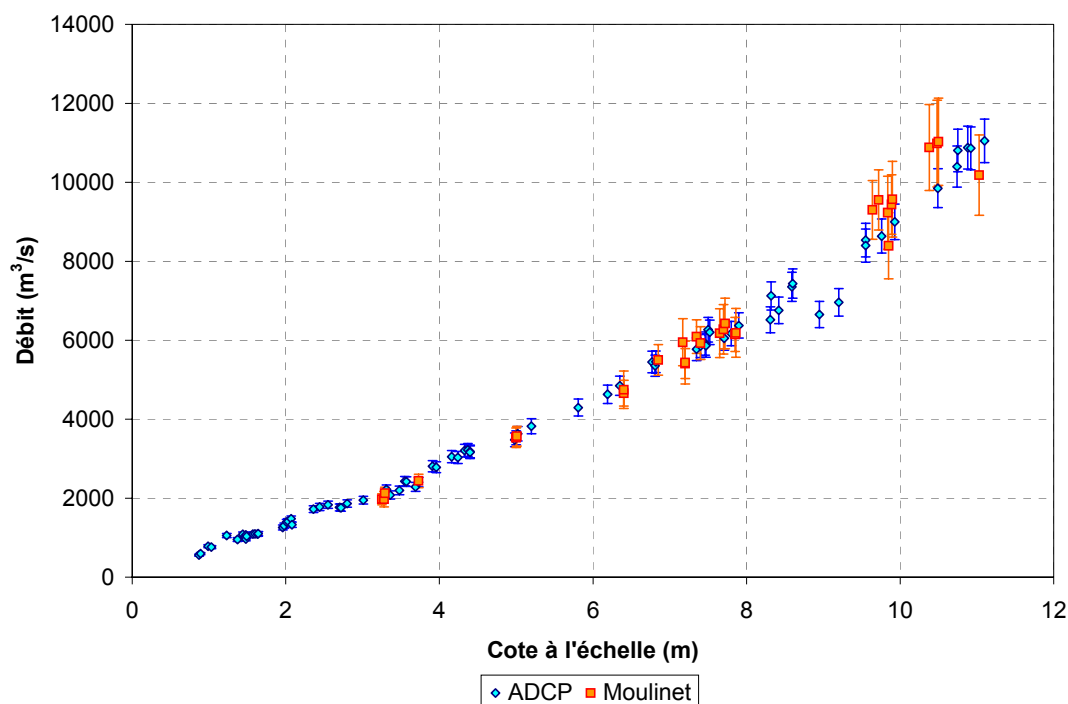


Figure 10 - Beaucaire – Échantillon complet avec incertitudes associées aux débits jaugés

Sur la base de la figure ci-dessus, seules deux valeurs paraissent suspectes, car en limite de la plage des incertitudes. Les incertitudes mentionnées ici sont des incertitudes élargies avec un coefficient

⁶ Pour 4 jaugeages, le cahier de jaugeage indique que le débit est la somme d'un débit jaugé et d'un débit de débordement estimé sur site par les jaugeurs en fonction de la hauteur moyenne de la lame d'eau et de la vitesse moyenne de débordement. L'incertitude sur ce débit estimé est très importante, mais ce débit ne représente qu'une petite contribution du débit total. Un calcul de l'incertitude de mesure associée au débit total conduit à une valeur de l'ordre de $\pm 8 \%$.

⁷ Coefficient de surface d'un site en partie connu ; si C_2 devait être remis en cause, cette valeur d'incertitude pourrait être portée à $\pm 14 \%$ (notamment pour les jaugeages de 1994 et 2003, qui ont été réalisés à la restitution de Beaucaire et non à la traîle)

⁸ Sur cette représentation en valeurs naturelles, le lecteur peut avoir l'impression d'une dispersion plus importante des points pour les valeurs hautes de débit. Cette impression est une conséquence directe de la nature des incertitudes, qui sont proportionnelles aux valeurs de débit. Une représentation logarithmique permet de constater que le nuage de points a la même épaisseur sur l'ensemble du domaine.

$k = 2$, correspondant à un niveau de confiance de 95 %. Il est donc tout à fait possible que des valeurs se situent en dehors de cet intervalle, sans pour autant être des valeurs aberrantes.

Par ailleurs, cet échantillon complet a été obtenu avec plusieurs méthodes de mesure (ADCP, moulinet complet, moulinet en surface), sur une période de 11 années au cours de laquelle il est possible que la morphologie de l'écoulement ait évolué (modification du lit), ce qui pourrait se traduire par une évolution de la courbe hauteur-débit. Cette évolution des conditions entraîne le non-respect de la condition 1 (reproductibilité) du paragraphe 3.4, puisque le "mesurande" évolue au cours du temps.

Du point de vue de la construction de la courbe hauteur-débit du site, il est pertinent de prendre en compte le maximum d'informations disponible, donc de conserver l'échantillon complet pour construire la courbe, quelle que soit l'origine des valeurs expérimentales.

En complément, il est intéressant pour l'expérimentateur de considérer des échantillons réduits, construits en tenant compte de considérations issues de l'expérience de terrain (valeurs aberrantes ou possible dérive de la courbe au cours du temps par exemple).

Ainsi, à partir de l'échantillon complet, on construit les échantillons suivants :

- **Echantillon n° 1 :**

Il est obtenu à partir de l'échantillon complet (comportant 108 jaugeages) auquel sont enlevés les jaugeages de cote inférieure à 3 m et les jaugeages reconnus aberrants (jaugeages ADCP du 10 septembre 2002). Le rapport d'étude CETIAT n° 2360031 a montré que les jaugeages de surface ont une incertitude plus importante que les autres. Les jaugeages de surface redondants avec un jaugeage complet (jaugeage complet au moulinet ou jaugeage ADCP) sont donc supprimés. En effet, ils permettent de confirmer la mesure complète au moulinet ou à l'ADCP mais ont une incertitude plus grande. Ils n'apportent donc pas de plus value sur la qualité de l'interpolation. L'échantillon n° 1 compte alors 70 jaugeages.

- **Echantillon n° 2 :**

A partir de l'échantillon n° 1, on conserve les jaugeages compris entre le 5 novembre 1992 et le 8 janvier 1994 (16 jaugeages)

- **Echantillon n° 3 :**

A partir de l'échantillon n° 1, on conserve les jaugeages compris entre le 23 mars 94 et le 4 décembre 2003 (54 jaugeages)

L'échantillon n° 1 a été scindé en deux sous-ensembles (échantillons n° 2 et n° 3) pour tenir compte de l'évolution des lits mineur et majeur à l'aval de Beaucaire au cours de la période recouverte par les jaugeages utilisés, soit de novembre 1992 à décembre 2003.

Enfin, sur chacun de ces échantillons, on distinguera deux domaines en fonction de la cote à l'échelle. Sur le terrain, la transition se situe aux environs de 8,50 m pour la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600). Sur chacun des échantillons, on observe qu'il n'y a aucun jaugeage pour une cote comprise entre 8,60 m et 9,55 m. Le premier sous-domaine comprendra alors les jaugeages de 3 m à 8,6 m et le second sous-domaine comprendra les jaugeages de 9,55 m à 11,10 m.

4.2. Qualité de l'interpolation

La qualité de l'interpolation dépend du type de loi utilisée. Au vu de l'allure générale de l'ensemble des points, plusieurs lois peuvent être choisies :

- Loi polynomiale, de la forme $Q = \sum_{i=0}^n a_i \cdot h^i$, de degré à définir ;
- Loi puissance, de la forme $Q = a \cdot h^b$;
- Loi de Manning-Strickler $Q = b \cdot h^{5/3} + a$.

Dans les deux premiers cas, ces lois sont uniquement une représentation mathématique de l'ensemble des points, tandis que la troisième est une modélisation de la physique du phénomène.

Dans les paragraphes suivants, l'influence du choix du type de loi est illustrée sur l'échantillon n° 1.

Sans connaissance préalable du modèle physique décrivant le phénomène sur l'ensemble du domaine considéré, le choix du type de loi peut être réalisé en s'appuyant sur des outils de test statistique, dont le premier est l'analyse des résidus (écarts entre les valeurs expérimentales et les prédictions calculées par la loi) : ceux-ci doivent être répartis de manière aléatoire autour de la valeur moyenne (par construction, cette moyenne est nulle pour une régression non pondérée). En effet, si les résidus montrent une tendance pouvant être modélisée, cela montre que la loi choisie ne représente pas le phénomène physique de manière suffisante.

4.2.1. Régression polynomiale

Le choix de la loi polynomiale est guidé par l'allure de la courbe et par l'allure des résidus, en partant toujours du polynôme de degré le plus faible (polynôme de degré 1 $\Rightarrow$ équation d'une droite).

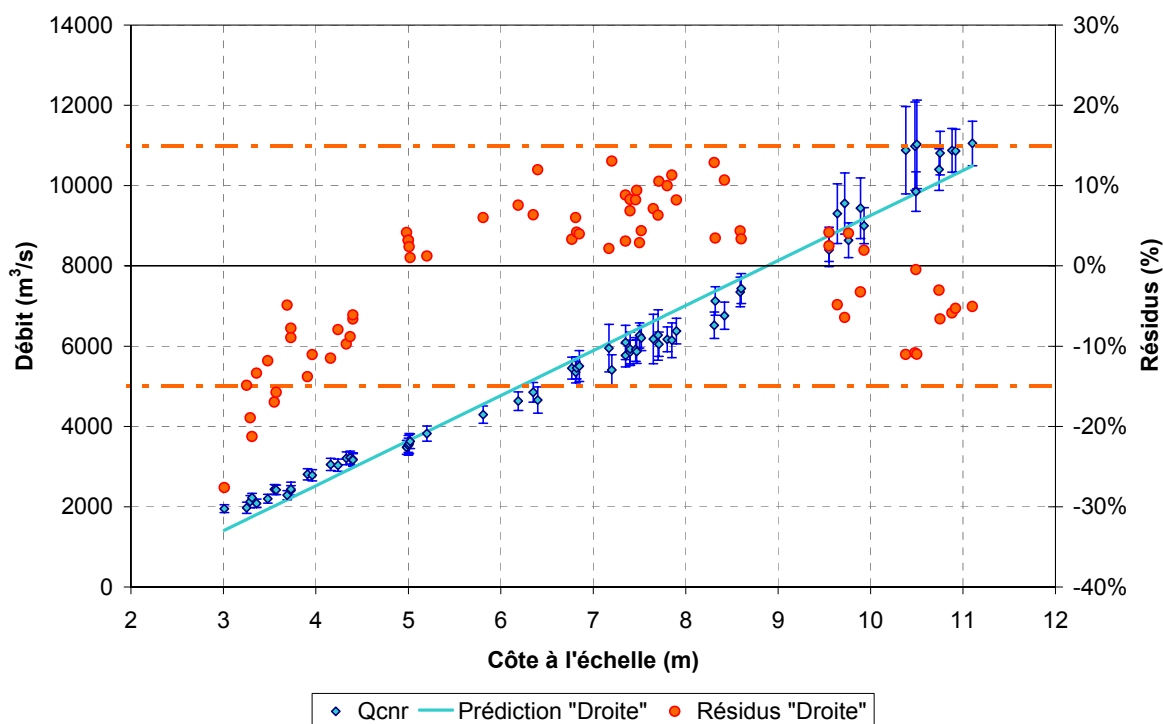


Figure 11 – Beaucaire – Échantillon n° 1 - Modélisation "Droite" et résidus

Pour faciliter la comparaison d'une courbe à l'autre, la limite de $\pm 15\%$ pour les résidus est systématiquement représentée en pointillés oranges.

La figure 11 montre la répartition des résidus pour un polynôme de degré 1 : on constate que la répartition des résidus n'est pas aléatoire (en orange), ce qui incite à choisir un degré plus élevé, comme représenté sur la figure 12.

La figure 12 montre la répartition des résidus pour un polynôme de degré 2 :

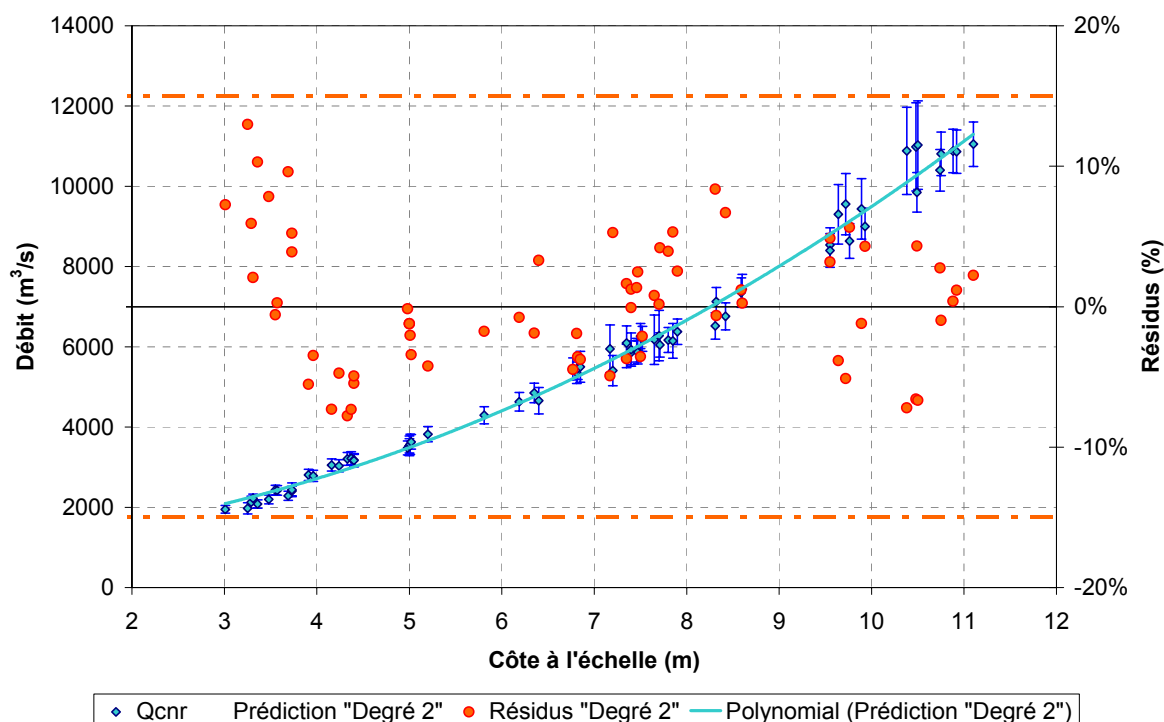


Figure 12 - Beaucaire – Échantillon n° 1 - Modélisation polynomiale degré 2

La figure 12 montre la répartition des résidus pour un polynôme de degré 2 : on constate que la répartition des résidus ne montre pas de tendance particulière (en orange),

Le polynôme est de la forme : $Q = a + b \cdot h + c \cdot h^2$, avec les coefficients suivants :

Tableau 3 - Coefficients du polynôme

	Coefficients de la régression
a	1053,65
b	129,85
c	71,44

4.2.2. Loi puissance

Une loi puissance peut également être choisie, de la forme $Q = a \cdot h^b$. Contrairement à la loi de Manning-Strickler, cette représentation n'est pas un modèle physique.

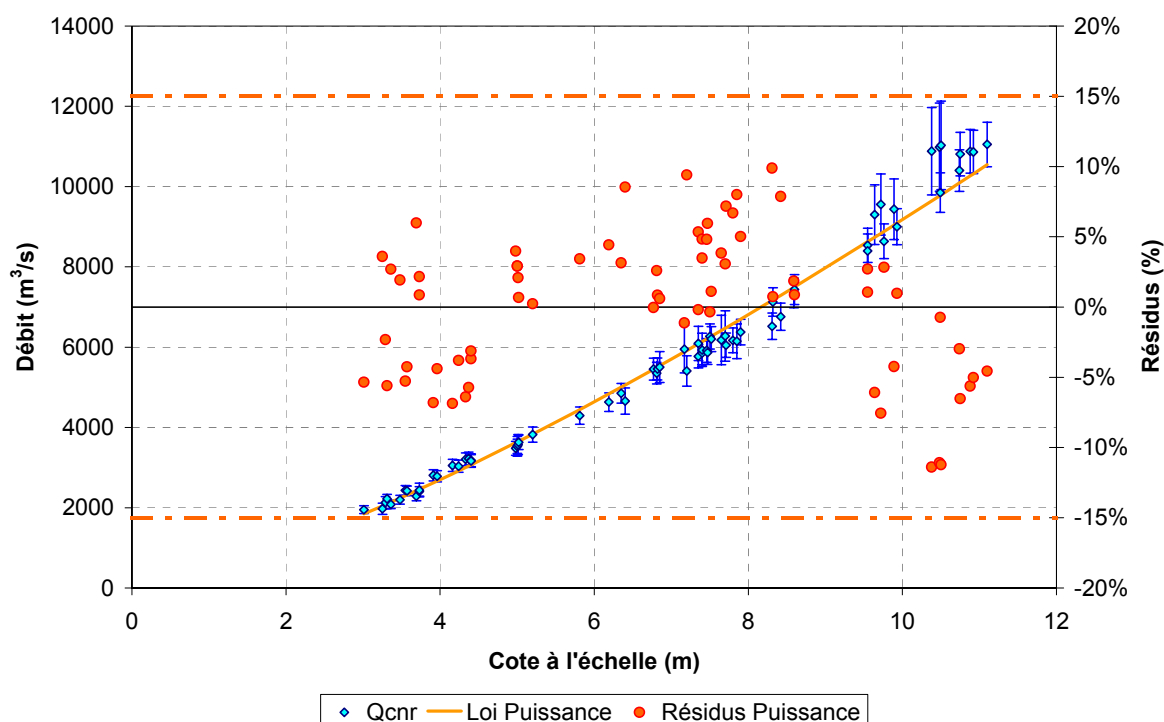


Figure 13 - Beaucaire – Échantillon n° 1 - Modèle Puissance

La figure 13 montre la répartition des résidus pour la loi puissance: on constate que la répartition des résidus montre une tendance ((augmentation de 3 à 7 m puis diminution au-delà de 7 m).

Tableau 4 - Coefficients du modèle Puissance

	Loi puissance
<i>a</i>	423,7
<i>b</i>	1,3355

4.2.3. Loi de Manning-Strickler

Pour des phénomènes dont la loi physique est établie, il peut être pertinent de considérer la loi correspondante plutôt qu'une loi polynomiale. Pour les écoulements à surface libre en régime permanent, dont la largeur est grande devant la hauteur, la loi décrivant le phénomène physique est la loi de Manning-Strickler, qui s'écrit :

$$Q = K \cdot L \cdot h^{5/3} \sqrt{i} \quad (8)$$

où K est un coefficient de rugosité, L la largeur de l'écoulement, i la pente et h la hauteur.

Un changement de variable est effectué $H = h^{5/3}$ pour se ramener à une régression linéaire de la forme :

$$Q = K' \cdot H \text{ où } K' \text{ est une constante} \quad (9)$$

Le changement de variable est appliqué aux points expérimentaux, puis la régression est construite de manière à correspondre à la loi ci-dessus. Dans le cas présent, le zéro de l'échelle ne correspond pas nécessairement au débit nul, de sorte que le modèle est de la forme :

$$Q = K' \cdot H + c^{\text{ste}} \quad (10)$$

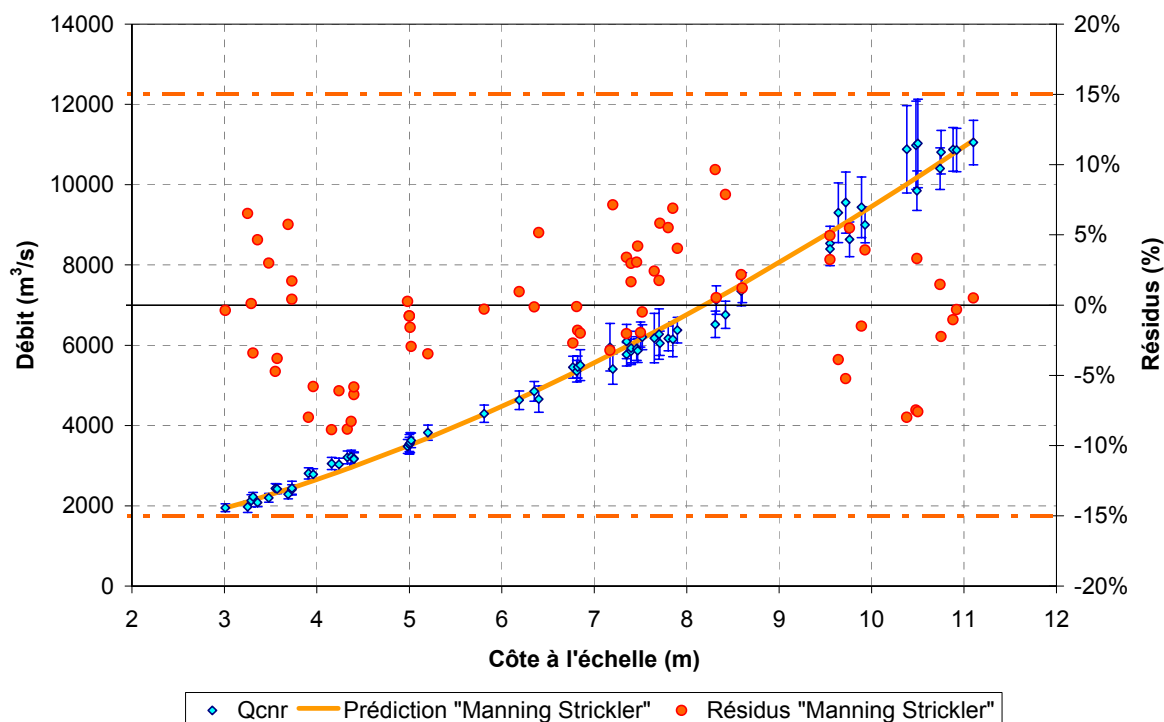


Figure 14 - Beaucaire –Échantillon n° 1 - Modèle Manning-Strickler

La figure 14 montre la répartition des résidus pour la loi de Manning-Strickler : on constate que la répartition des résidus ne montre pas de tendance.

Les coefficients de la courbe sont les suivants : $Q = a + b \cdot h^{5/3}$

Tableau 5 - Coefficients du modèle Manning-Strickler

	Coefficients du modèle de Manning Strickler
a	768,00
b	187,18

4.2.4. Écart entre les lois et choix de la loi

Quatre lois différentes ont été utilisées pour construire la courbe correspondant aux données de l'échantillon n° 1 : polynôme de degré 1, polynôme de degré 2, loi puissance et loi de Manning-Strickler.

Le choix de la loi s'appuie tout d'abord sur la répartition des résidus (**la loi la plus appropriée conduit à une distribution aléatoire des résidus**). Ce critère permet d'éliminer le polynôme de degré 1 (voir Figure 11 – Beaucaire – Échantillon n° 1 - Modélisation "Droite" et résidus) et la loi puissance (voir Figure 13 - Beaucaire – Échantillon n° 1 - Modèle Puissance), qui montrent toutes deux une tendance sur la répartition des résidus.

La répartition des résidus est également représentée sur la figure ci-dessous :

- les résidus de la régression polynomiale de degré 1 (droite) montrent une tendance, représentée en orange sur la figure (la représentation graphique de la tendance, sous forme de courbe orange, est obtenue par une régression aux moindres carrés, appliquée sur les valeurs des résidus) ;
- les résidus de la loi en puissance montrent également une tendance, représentée en vert ; celle-ci est moins marquée que la tendance pour la droite, mais est plus marquée que pour la loi de degré 2 et la loi de Manning-Strickler ;
- enfin, les résidus de la loi de degré 2 et de la loi de Manning-Strickler ne montrent pas de tendance particulière (trait bleu et trait gris, quasiment superposés avec l'axe des abscisses).

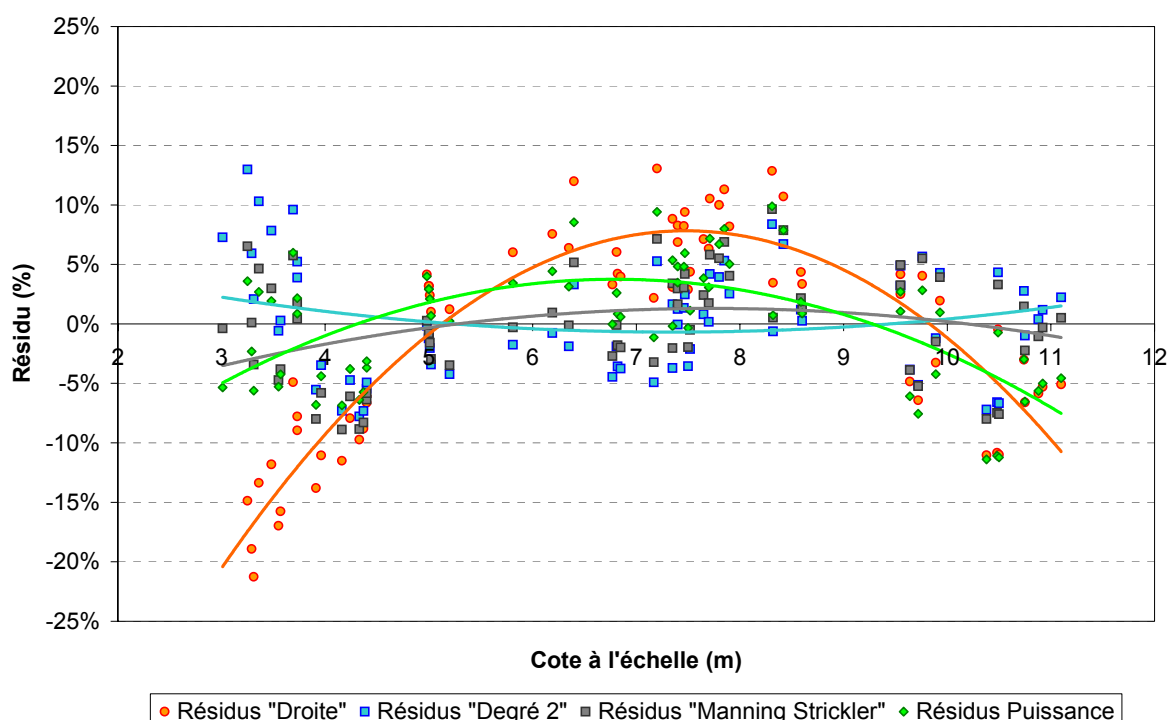


Figure 15 – Beaucaire - Échantillon n° 1 - Comparaison de la répartition des résidus

Les deux lois qui passent le critère de distribution des résidus sont donc le modèle polynomial de degré 2 et la loi de Manning-Strickler.

Entre ces deux lois, **le choix se portera préférentiellement sur la loi de Manning-Strickler**, qui est un modèle physique. L'écart entre les deux lois est représenté figure 16.

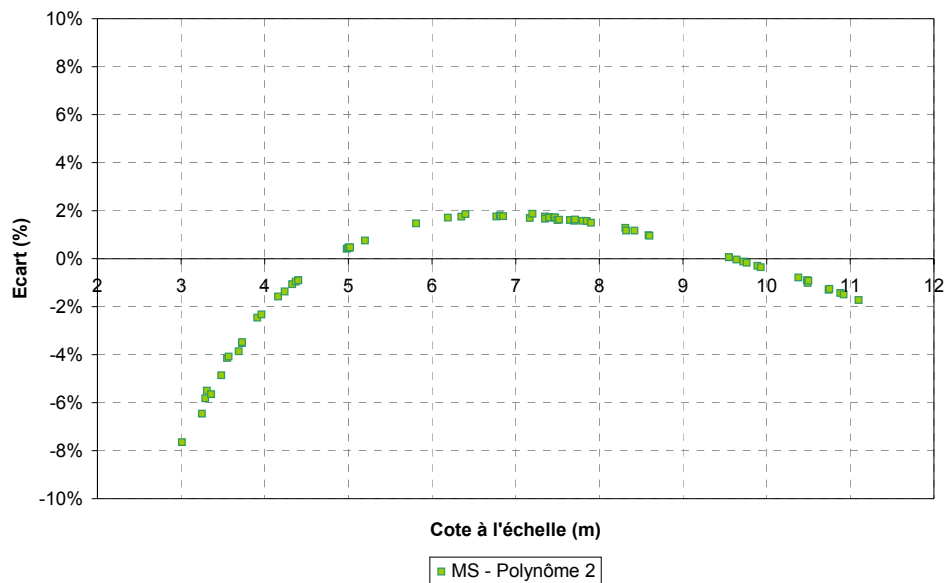


Figure 16 - Beaucaire - Échantillon n° 1 - Écart entre Manning-Strickler et polynôme degré 2

Pour des raisons pratiques, il peut être intéressant de considérer une loi polynomiale (notamment pour déterminer facilement la pente de la courbe, nécessaire au paragraphe suivant). Dans le cas étudié, il est possible de retenir le modèle polynomial de degré 2, sans que cela entraîne une perte d'information trop importante.

4.2.5. Conclusion sur la qualité de l'interpolation

Une loi de modélisation étant retenue (loi de Manning-Strickler dans le cas de l'échantillon n° 1), la qualité de l'interpolation est estimée à partir des résidus. Le nombre de valeurs étant supérieur à 10, l'incertitude-type associée à la qualité de l'interpolation est estimée à partir de l'écart-type des résidus :

$$u_{\text{lissage}} = \sigma(\text{résidus}) = 4,5 \% \quad (11)$$

4.3. Propagation des incertitudes de mesure de niveau d'eau

4.3.1. Incertitudes des mesures de niveau

4.3.1.1. Lecture des échelles limnimétriques

Sur le cas de Beaucaire pris en exemple, on peut estimer que la continuité de l'échelle peut être comprise dans une erreur maximale égale à $\pm 0,05$ m

$$u_{\text{continuité}}(h) = \frac{0,05}{\sqrt{3}} \text{ (en m)} \quad (12)$$

Sur ce même cas, la dérive de l'échelle est nulle, ou en tout cas comprise dans l'incertitude de lecture de l'échelle. L'incertitude de lecture est estimée à partir des écarts entre la cote à l'échelle et la cote enregistrée par le limnimètre. Par expérience, les opérateurs estiment qu'un écart inférieur à 3 cm n'est pas significatif pour les jaugeages en écoulement normal. En période de crue, il se peut que cet écart dépasse 3 cm, mais une analyse est conduite a posteriori pour estimer si il y a une véritable dérive ou si l'écart plus important était dû à des conditions de mesures exceptionnelles. Ainsi, une incertitude-type de contrôle peut être estimée, en associant une loi de distribution rectangulaire :

$$u_{\text{contrôle}}(h) = \frac{0,03}{\sqrt{3}} \text{ (en m)} \quad (13)$$

Alors, on peut estimer que l'incertitude associée à la mesure de la cote à l'échelle est liée à la combinaison de la lecture et de la continuité :

$$U(h) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,05}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{\sqrt{3}}\right)^2} \approx 0,067 \text{ m (k=2)}$$

valeur d'incertitude que l'on arrondira à la valeur supérieure, soit $U(h) \approx 0,07$ m .

4.3.1.2. Enregistrements au limnimètre

Les calculs sont réalisés conformément au paragraphe 3.3.2.4.

- Performances de l'instrument (à partir des performances annoncées par les constructeurs) :

$$u_{\text{EMT}}(h) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \text{ (en m)} \quad (14)$$

- Dérive dans le temps

Les valeurs sont données dans le tableau en ANNEXE 8. La figure 17 illustre les écarts au cours du temps.

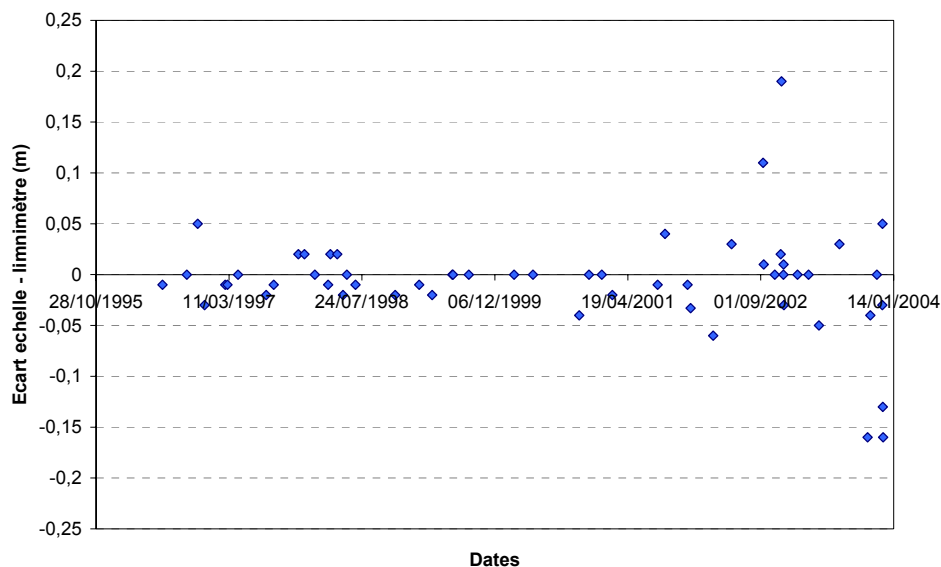


Figure 17 - Suivi dans le temps du limnimètre de Beaucaire

Le suivi du limnimètre de Beaucaire est représenté sur la figure 18, année par année.

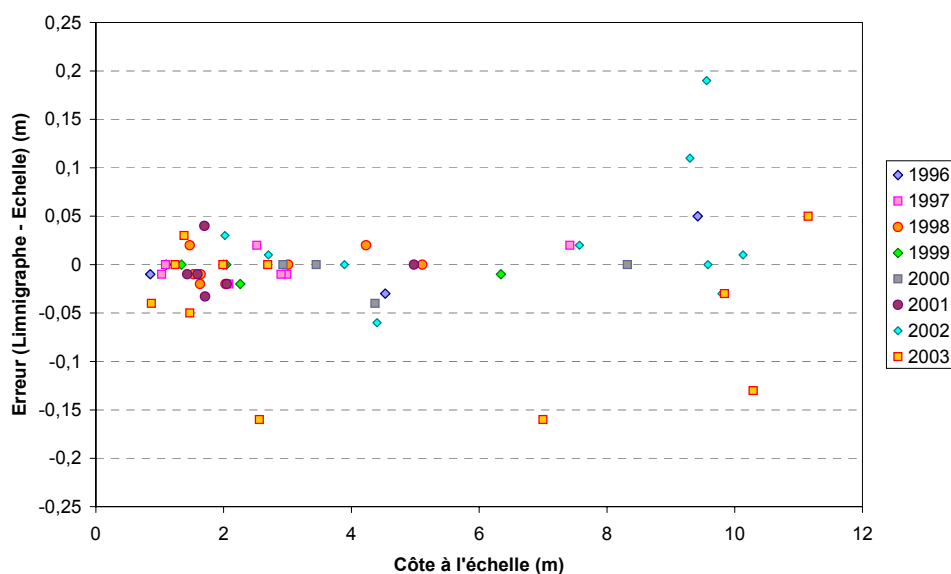


Figure 18 - Dérive du limnimètre à Beaucaire

La période couvre les jaugeages de 1996 à 2003 (l'appareil a été changé en janvier 2004). Sur la figure suivante, les points cerclés de pointillé rouge sont des points réalisés en période de crue, pour lesquels les conditions sont telles que le réglage de l'appareil n'est pas réalisé (les opérateurs estiment que la lecture de l'échelle ne permet pas de déterminer si l'appareil donne une valeur erronée ou non en raison du batillage, d'une mesure de pression influencée par la pression dynamique ou encore de l'influence du transport solide ou de corps immergés à proximité de la sonde).

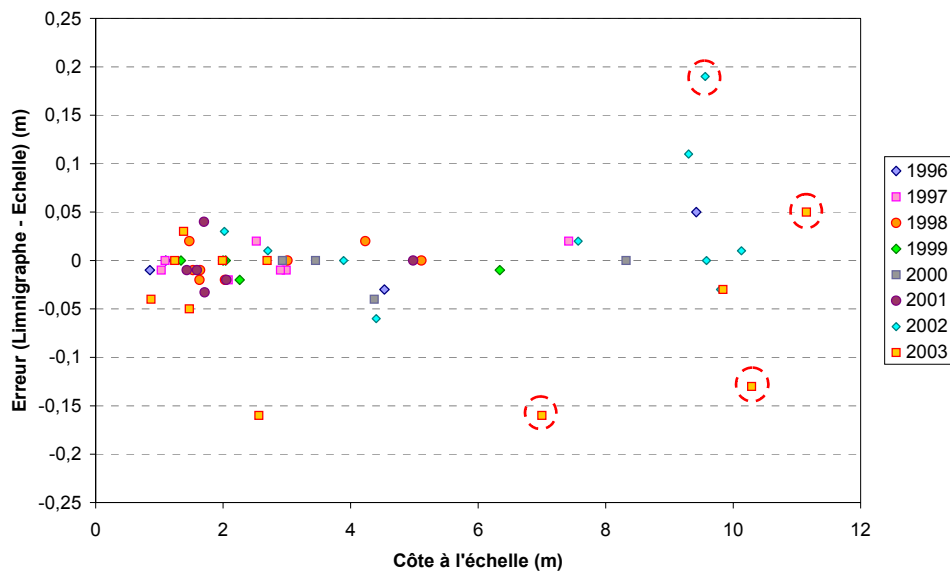


Figure 19 - Suivi du limni de Beaucaire - Points de crue

On constate que les valeurs des écarts sont positives ou négatives, ce qui indique que la dérive dans le temps n'est pas toujours de même sens⁹.

Sur cet exemple, on peut considérer que l'écart-type des valeurs d'écart est une estimation de la dérive du limnimètre et de la reproductibilité des comparaisons entre l'échelle et le limnimètre, comprenant une éventuelle dérive de l'échelle. L'écart-type est $\sigma \approx 0,05$ m, d'où l'incertitude-type associée à la dérive du limnimètre :

$$u_{\text{dérive}}(h) = \sigma \approx 0,05 \text{ (en m)} \quad (15)$$

La combinaison des deux composantes conduit à :

$$u(h) = \sqrt{u_{\text{EMT}}^2(h) + u_{\text{dérive}}^2(h)} = \sqrt{\left(\frac{0,01}{\sqrt{3}}\right)^2 + 0,05^2} \approx 0,05$$

L'incertitude élargie est alors $U(h) \approx 0,1$ m ($k=2$)

⁹ Si la dérive montrait un sens privilégié, cela pourrait indiquer un vieillissement de l'instrument, mais également une dérive lente du calage de l'échelle. En l'absence de sens privilégié, on peut conclure qu'il n'y a pas de dérive lente de l'échelle, ce qui n'exclut pas la possibilité d'un décalage de l'échelle lors d'un épisode particulier (crue par exemple).

- Incertitudes sur les mesures de niveau d'eau

En conclusion, sur l'exemple de Beaucaire, les incertitudes sur les mesures de niveau d'eau sont les suivantes :

- $U(h) \approx 0,07$ m pour les lectures à l'échelle ;
- $U(h) \approx 0,1$ m pour les mesures au limnimètre.

Pour traiter cet exemple, les incertitudes élargies des enregistrements des niveaux d'eau sont prises égales à ± 10 cm, constantes sur l'ensemble du domaine concerné¹⁰.

4.3.2. Pente de la courbe de Beaucaire

Il est nécessaire de calculer la pente de la courbe. Celle-ci est déterminée par dérivation de la loi de Manning-Strickler (ou approchée par la dérivée du polynôme de degré 2) ; elle est donc proportionnelle à la hauteur et varie de 700 m³/s/m à 1 600 m³/s/m sur l'ensemble du domaine.

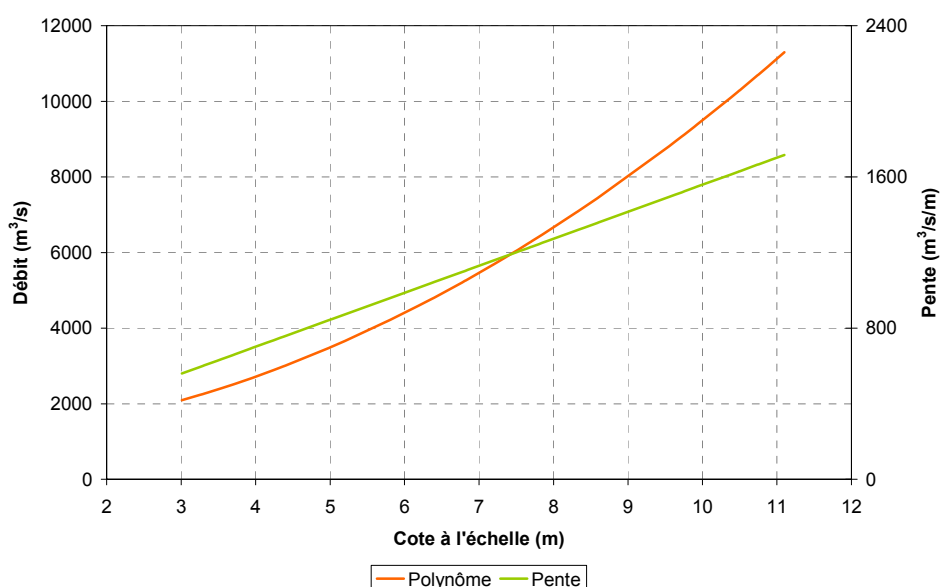


Figure 20 - Beaucaire – Echantillon n° 1 – Pente

4.4. Combinaison des incertitudes

Le calcul de la combinaison des incertitudes est réalisé sur l'échantillon n° 1. La combinaison des trois composantes d'incertitude¹¹ est réalisée selon la relation suivante :

¹⁰ Ces incertitudes sont les incertitudes associées aux mesures réalisées par le capteur lors de l'utilisation de la courbe, et non lors de sa construction. Ces incertitudes ne sont donc pas les incertitudes associées aux jaugeages.

¹¹ Dans le cas de Beaucaire, il est impossible de démontrer la redondance totale entre les composantes (voir paragraphe 3.4), de sorte que les trois composantes sont bien prises en compte dans l'estimation de l'incertitude de mesure

$$u^2(Q) = u^2(Q_i) + u_{\text{lissage}}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot u(h) \right)^2 \quad (16)$$

où :

- (a) $u(Q_i)$ est l'incertitude-type des valeurs de référence servant à construire la courbe (incertitude associée aux jaugeages dans le cas présent)
- (b) u_{lissage} est l'incertitude-type associée à l'interpolation
- (c) $\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot u(h)$ est l'incertitude-type de lecture des cotes à l'échelle (niveaux), multipliée par la pente de la courbe $Q=f(h)$.

L'application de la relation (16) à l'échantillon n° 1 est réalisée avec les valeurs suivantes :

- $u(Q_i) = \frac{5}{2} \%$ pour les jaugeages à l'ADCP
- $u(Q_i) = \frac{7}{2} \%$ pour les jaugeages complets au moulinet
- $u(Q_i) = \frac{10}{2} \%$ pour les jaugeages au moulinet en surface
- $u_{\text{lissage}} = 4,5 \%$ est l'écart-type des résidus (estimés à partir des écarts entre les jaugeages et la courbe)
- $\frac{\partial Q}{\partial h}$ donné par dérivation du modèle de Manning-Strickler (ou du degré 2)
- $u(h) = \frac{0,1}{2} m$ (estimée sur la mesure enregistrée par le limnimètre)

L'application numérique est réalisée pour chaque valeur de débit ; elle conduit à une valeur d'incertitude élargie comprise entre $\pm 10,3 \%$ et $\pm 13,5 \%$, comme représenté sur la figure 21 :

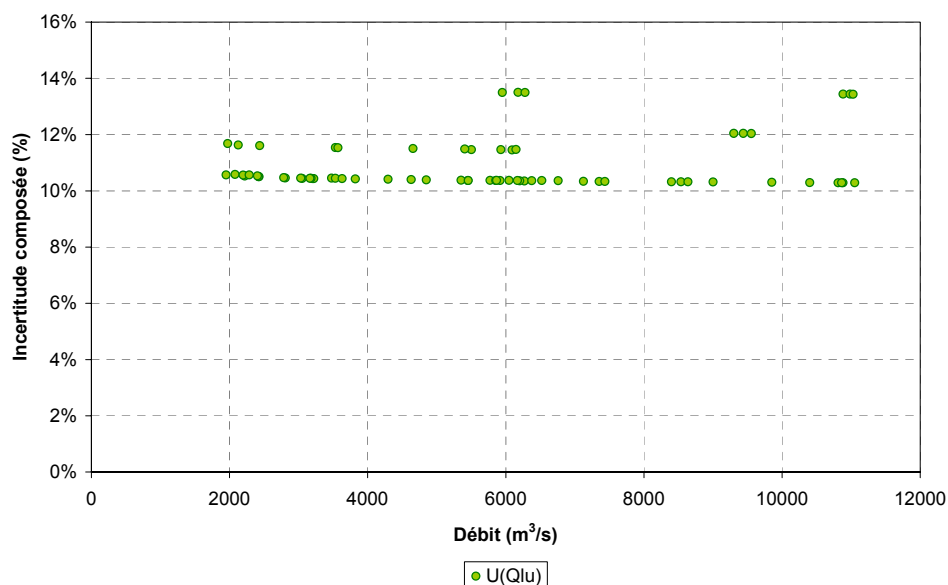


Figure 21 – Beaucaire - Echantillon n° 1 - Incertitude U(Q)

Les valeurs élevées correspondent aux jaugeages de surface. Sur cet échantillon, on peut alors retenir comme incertitude élargie associée aux lectures de débit une valeur de l'ordre de $\pm 14\%$.

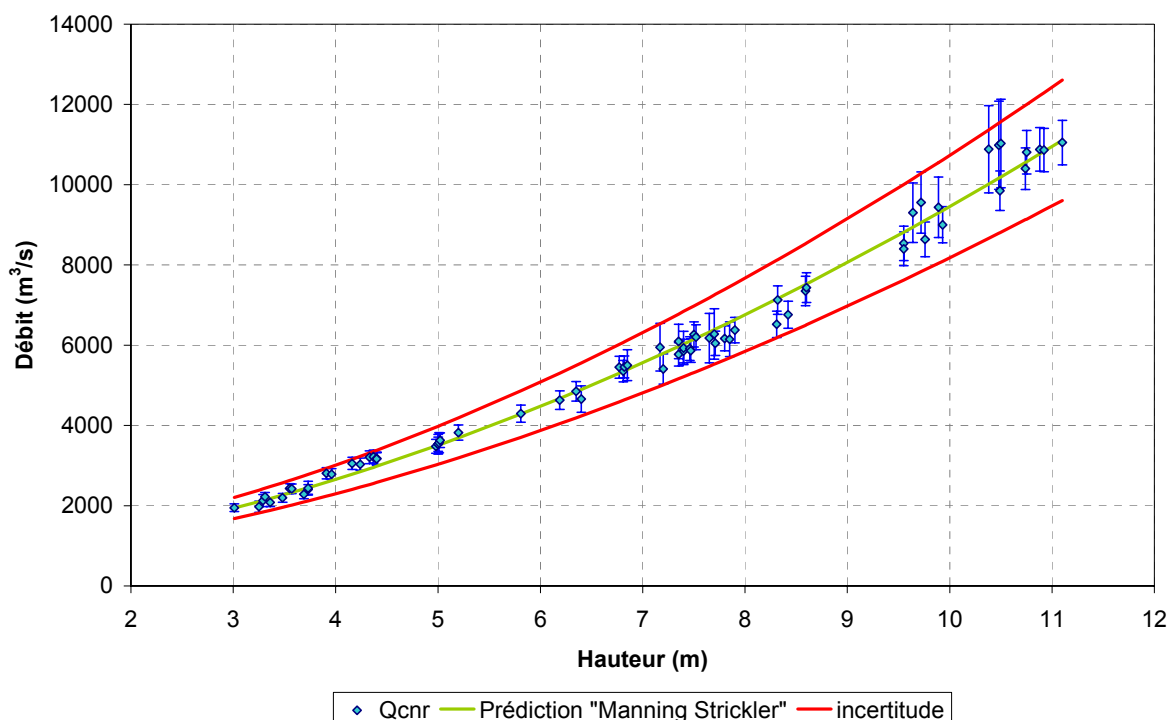


Figure 22 - Beaucaire – Echantillon n°1 - Incertitudes sur les débits lus à partir de la courbe

Exemple : pour une valeur de cote enregistrée par le capteur à 5,5 m avec une incertitude élargie estimée à $\pm 0,1$ m, le débit prédit par la courbe est de :

$$Q = a + b \cdot h^{5/3}, \text{ avec } a = 768,00 \text{ et } b = 187,18, \text{ soit } Q = 768,00 + 187,18 \times 5,5^{5/3} = 3976 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$\text{L'incertitude sur cette valeur prédite est } U(Q) = 14\% \text{ soit } U(Q) = 14/100 \times 3976 = 557 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Pour exprimer le résultat, l'incertitude est arrondie avec deux chiffres significatifs, puis la valeur de débit est arrondie en fonction de l'incertitude, d'où : $Q_{(5,5 \text{ m})} = (3980 \pm 560) \text{ m}^3/\text{s} (k=2)$.

Cette incertitude est estimée sur le domaine couvert par les valeurs expérimentales. Pour une extrapolation sur un domaine plus étendu, cette incertitude peut être utilisée dans la mesure où l'extension du domaine reste petite.

Note : la figure 22 représente la courbe $Q(h)$ déterminée en ne considérant qu'un seul domaine pour l'ensemble des cotes. Il est en fait plus judicieux de prévoir deux domaines, comme ceci est exposé au paragraphe 4.5.1.

4.5. Analyses complémentaires sur l'exemple de Beaucaire

La connaissance des incertitudes permet d'analyser les courbes, notamment pour la comparaison des échantillons, la distinction de deux sous-domaines ou encore l'analyse de l'évolution possible de la courbe dans le temps.

4.5.1. Distinction de deux sous-domaines

Les modélisations qui ont été présentées sur l'échantillon n° 1 ont été construites sur le domaine complet couvert par l'échantillon. Du point de vue hydrométrique, l'observation du terrain (réalisée par les jaugeurs) montre que le Rhône à Beaucaire connaît deux fonctionnements différents, la transition ayant lieu pour une cote à l'échelle comprise entre 8 et 9 m. Comme pour toute analyse de données, les éléments issus de l'analyse statistique doivent être confrontés aux éléments rapportés par les expérimentateurs, et complétés en regard de ces derniers, tant pour la construction que pour l'utilisation des courbes. Ainsi, en s'appuyant sur l'échantillon n° 1, deux sous-domaines ont été construits. La loi choisie est Manning-Strickler pour les deux sous-domaines et conduit à la figure 23 :

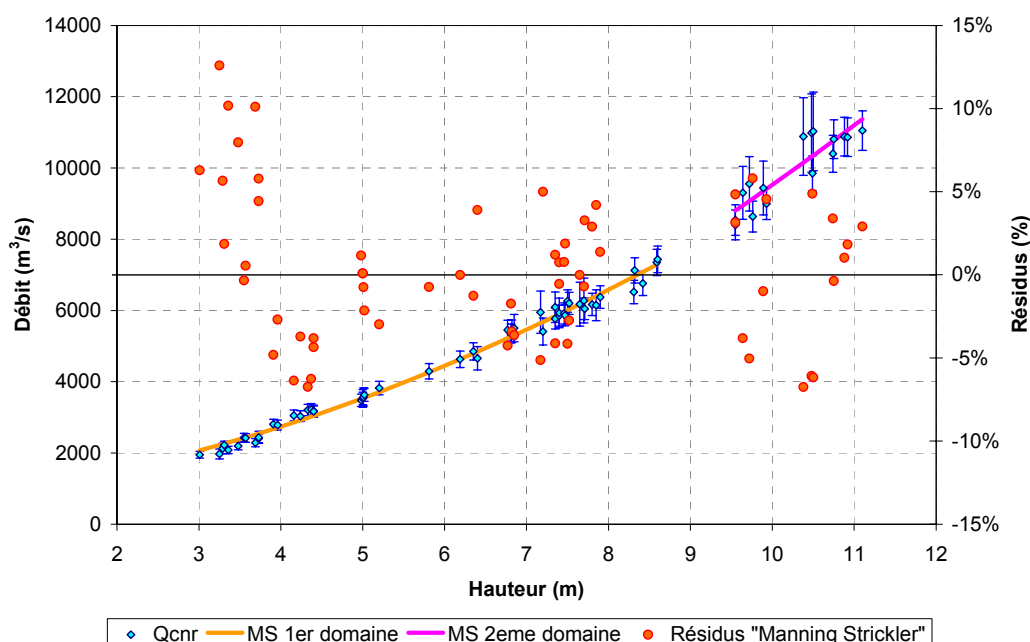


Figure 23 - Beaucaire – Echantillon n° 1 - Distinction de deux sous-domaines

Tableau 6 - Coefficients du modèle Manning-Strickler

	1 ^{er} domaine : $h < 8,6$ m	2 ^{ème} domaine : $h > 8,6$ m
a	973,13	-205,22
b	175,23	209,61

4.5.2. Évolution de la courbe dans le temps

Les jaugeages ont été réalisés sur une période de 11 années (novembre 1992 à décembre 2003) au cours de laquelle il est possible que la morphologie de l'écoulement ait évolué (modification du lit), ce qui pourrait se traduire par une évolution de la courbe hauteur-débit. Une analyse est donc conduite pour déterminer si les valeurs mesurées permettent de mettre en évidence une évolution significative de la courbe dans le temps.

Des modifications importantes du lit sont susceptibles de se produire à la suite d'évènements tels que des crues par exemple. Au cours de la période étudiée, quatre crues ont pu être jaugées (en octobre 1993, janvier 1994, novembre 2002 et décembre 2003). Elles ont permis de mesurer des débits élevés (supérieurs à 8 000 m³/s). C'est donc à la suite de ces crues que d'éventuelles modifications du lit - donc de la courbe - ont pu apparaître. Pour détecter si une telle modification de la courbe est significative, deux échantillons supplémentaires sont construits, à partir de l'échantillon n° 1 :

- Échantillon n° 2 : jaugeages compris entre le 5 novembre 1992 et le 8 janvier 1994 (16 jaugeages) intégrant les jaugeages des crues de 1993 et 1994 ;
- Échantillon n° 3 : jaugeages compris entre le 23 mars 94 et le 4 décembre 2003 (54 jaugeages) intégrant les jaugeages des crues de 2002 et 2003.

Comme pour l'échantillon n° 1, l'analyse est réalisée en distinguant les deux sous-domaines. En effet, du point de vue hydrométrique, l'évolution du lit n'est pas identique sur tout le domaine (incision du lit mineur pour les bas débits, peu d'influence sur la courbe, alors que engrèvement du lit majeur pour les hauts débits peut être plus marqué). Cette analyse est représentée sur la figure suivante :

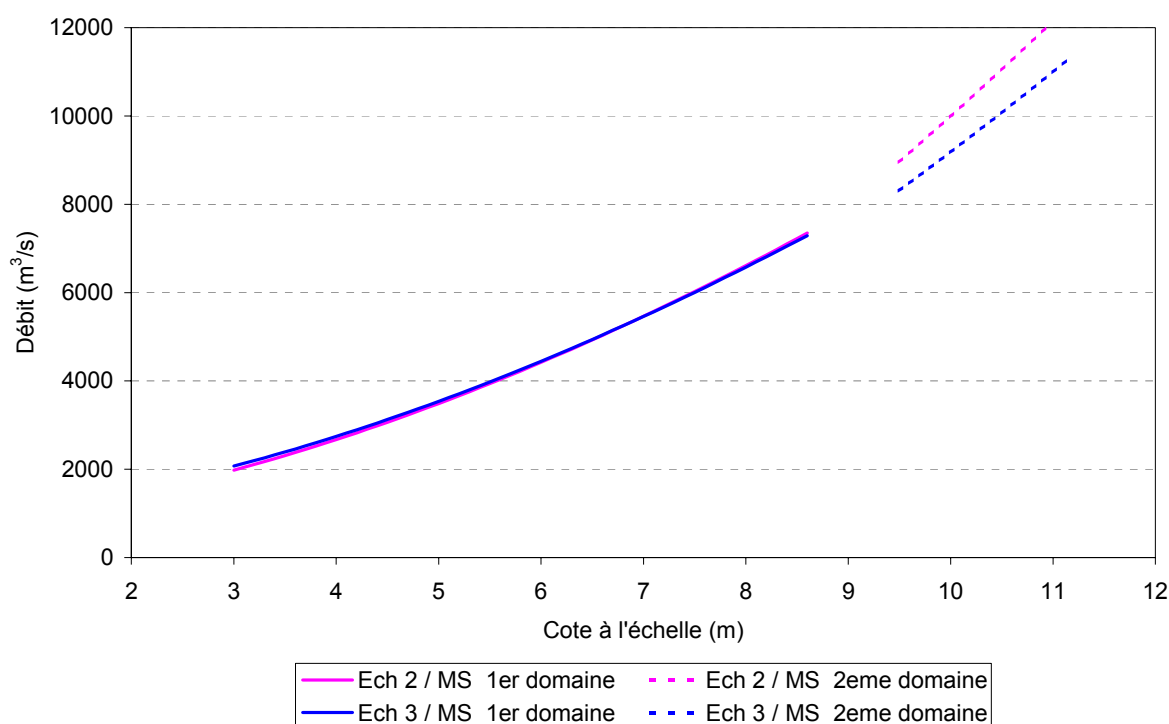


Figure 24 - Comparaison des échantillons n° 2 et n° 3 sur deux sous-domaines

Pour le premier sous-domaine, on constate que les deux courbes sont superposées, l'écart entre elles est très faible. Par contre, pour le deuxième sous-domaine, l'écart est plus important et peut être interprété comme une tendance dans l'évolution de la courbe en fonction du temps : à débit constant, le niveau observé est plus haut

4.6. Bilan

Les paragraphes 4.5.1 et 4.5.2 montrent que deux domaines peuvent être distingués, et qu'une évolution de la courbe dans le temps est mise en évidence pour le domaine des forts débits (débits supérieurs à 7 300 m³/s).

Tableau 7 – Incertitudes estimées

	U(Q _{lu}) maximale sur domaine complet (k=2)	U(Q _{lu}) sur domaine < 8,5 m (k=2)	U(Q _{lu}) sur domaine > 8,5 m (k=2)
Echantillon n° 1	13,5%	13,5%	13,5%
Echantillon n° 2	13,7%	12,5%	10,7%
Echantillon n° 3	11,4%	12,2%	6,0%

L'incertitude U(Q_{lu}) maximale est estimée en considérant la valeur d'incertitude maximale sur le domaine concerné. U(Q_{lu}) est donnée avec un coefficient d'élargissement k = 2, correspondant à un intervalle de confiance de 95 %.

Il est possible de proposer plusieurs valeurs d'incertitude associées à la courbe, selon l'application et la courbe retenue :

- **Utilisation générale de la courbe**

- ± 14 % pour l'incertitude de la courbe établie sur l'échantillon n° 1, couvrant les deux domaines, sur l'ensemble de la période {novembre 1992 – décembre 2003}. Cette incertitude intègre l'évolution de la courbe au cours de la période.
- ± 10 à ± 12 % pour l'incertitude de la courbe établie sur l'échantillon n° 3, couvrant les deux domaines, sur la dernière période {mars 1994-décembre 2003}.

- **Utilisation ponctuelle de la courbe** Par exemple, pour une extrapolation à la valeur maximale enregistrée par le limnimètre (valeur enregistrée en décembre 2003), il est possible de ne considérer que la courbe la plus récente, sur le domaine des forts débits (échantillon n° 3). Dans ce cas, l'incertitude associée à la valeur de débit extrapolée (à 11,3 m) est de l'ordre de ± 6 %. Cependant, cette valeur semble petite comparativement aux incertitudes obtenues sur le domaine complet ; il est à noter qu'elle est estimée à partir d'un nombre de jaugeages relativement faible, et l'on considèrera qu'une valeur réaliste est comprise entre ± 6 % (estimé sur les hauts débits) et ± 12 % (domaine complet, dates postérieures à 1994).

Attention, pour une utilisation de la courbe pour les crues à venir, on peut supposer qu'une évolution de la section mouillée à l'aval est toujours possible et l'on retiendra alors par précaution la valeur de ± 14 % estimée sur l'échantillon n° 1.

Le tableau 8 présente les débits prédits à 11,3 m en fonction du modèle de loi choisi.

**Tableau 8 - Valeurs de débits (m^3/s) estimées pour 11,3 m (NGF (ortho))
à la station de Beaucaire restitution (PK 269.600)**

	Modèle polynomial degré 2 Domaine complet (m^3/s)	Modèle Puissance Domaine complet (m^3/s)	Modèle Manning- Strickler Domaine complet (m^3/s)	Modèle Manning- Strickler (domaine > 8,5 m) (m^3/s)
Echantillon n°1	11 643	10 801	11 419	11 722
Echantillon n°2	12 564	11 622	12 186	12 800
Echantillon n°3	11 277	10 585	11 155	11 554

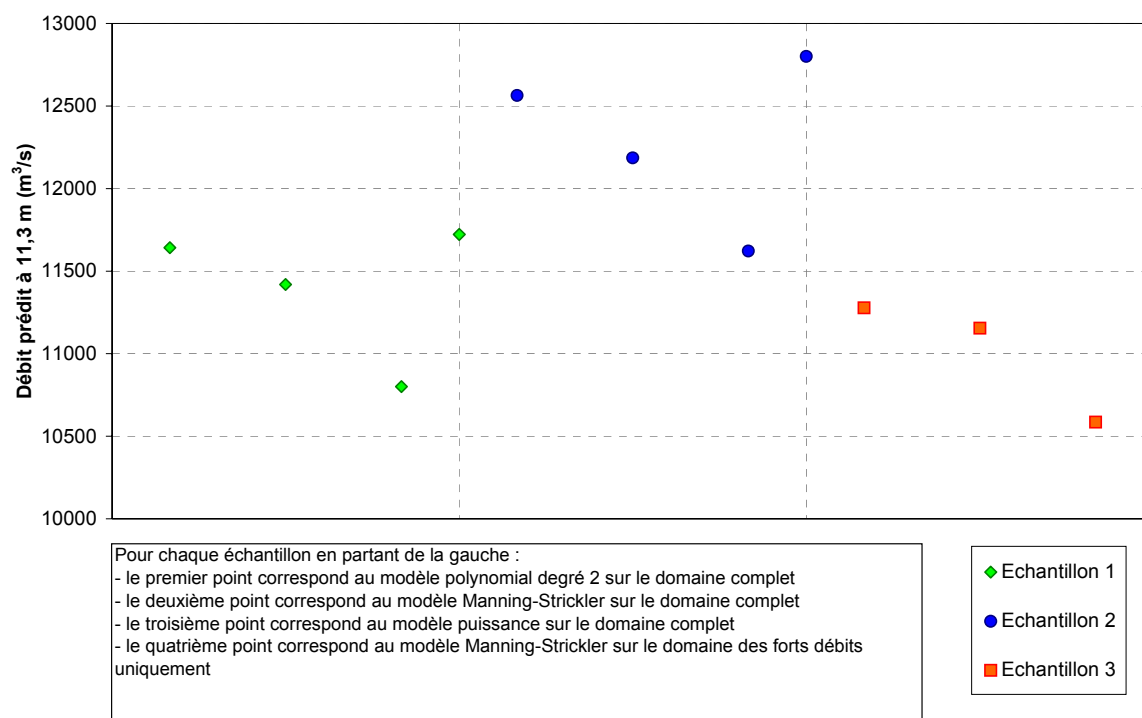


Figure 25 - Beaucaire – Sensibilité au choix de la loi et de l'échantillon – ex. à 11,3 m

On constate sur ce cas les éléments suivants :

- ⇒ En considérant un seul domaine, le modèle polynomial de degré 2 conduit à la valeur prédite la plus élevée ;
- ⇒ Pour tous les échantillons, le modèle puissance conduit toujours à la valeur prédite la plus basse ;
- ⇒ La dispersion intra-échantillon est du même ordre que la dispersion inter-échantillon, ce qui montre que le choix du modèle a autant d'influence que le choix de l'échantillon.

5. Conclusion générale

Cette étude présente une méthode d'estimation des incertitudes associées au débit annoncé à partir de l'utilisation d'une courbe $Q=f(h)$ et d'une mesure de niveau réalisée au limnimètre.

Les composantes d'incertitude à prendre en compte ainsi que les méthodes permettant de les estimer sont présentées de manière générique, puis appliquées à un exemple : station de Beaucaire-Tarascon, pour laquelle 28 jaugeages au moulinet (toutes profondeurs et surface) et 80 jaugeages à l'ADCP ont été réalisés entre novembre 1992 et décembre 2003. Ils couvrent une plage de débits allant de 762 m³/s à 11 051 m³/s. Une fois ces valeurs critiquées, nous avons construit l'échantillon n° 1 composés de 70 jaugeages pertinents.

L'estimation des incertitudes est effectuée sur cet exemple en comparant plusieurs types de loi d'interpolation (le choix de la loi d'interpolation est propre à chaque site) :

- Régression linéaire, de la forme $Q = b \cdot h + a$;
- Régression polynomiale du second degré, de la forme $Q = c \cdot h^2 + b \cdot h + a$;
- Loi puissance, de la forme $Q = b \cdot h^c$;
- Loi de Manning-Strickler, de la forme $Q = b \cdot h^{5/3} + a$.

Dans l'exemple étudié, la loi de Manning-Strickler a été retenue, conduisant à une valeur d'incertitude maximale de ± 14 % (incertitude exprimée à un niveau de confiance de 95 %, dont la valeur élevée est due en grande partie aux jaugeages de surface au moulinet).

L'étude de la courbe a été complétée par des éléments rapportés par les expérimentateurs. Des études de terrain ont mis en évidence l'existence de deux domaines sur la courbe de Beaucaire, avec une transition située autour de 8,50 m NGF (ortho). Par ailleurs, diverses observations de terrain tendent à montrer une évolution dans le temps des conditions géométriques de l'écoulement (engravement global du haut des berges entre 1974 et 1999 et encombrement croissant du lit majeur à l'aval de Beaucaire, sollicités pour les hauts débits).

L'étude de ces éléments et de leur influence sur l'incertitude associée à la courbe a été réalisée en construisant des échantillons complémentaires (n° 2 et n° 3), sur lesquels une estimation des incertitudes a été conduite de manière identique à l'échantillon n° 1.

La méthode d'estimation des incertitudes mise en œuvre dans cet exemple peut être appliquée de manière analogue à d'autres stations. Elle permet d'estimer l'incertitude associée au débit annoncé à partir de l'utilisation d'une courbe $Q=f(h)$ et d'une mesure de niveau réalisée au limnimètre.

Enrichi par l'analyse des éléments de terrain rapportés par les expérimentateurs, le bilan des incertitudes est un des éléments permettant de conclure quant à une dérive de la courbe dans le temps ou à l'existence de plusieurs domaines.

6. Annexes

ANNEXE 1	Beaucaire – Echantillon complet	42
ANNEXE 2	Beaucaire – Construction de l'échantillon n° 1	46
ANNEXE 3	Beaucaire – Construction de l'échantillon n° 2	49
ANNEXE 4	Beaucaire – Construction de l'échantillon n° 3	50
ANNEXE 5	Beaucaire – Courbes de l'échantillon n° 2.....	52
ANNEXE 6	Beaucaire – Courbes de l'échantillon n° 3.....	55
ANNEXE 7	Beaucaire – Coefficients des courbes	58
ANNEXE 8	Beaucaire – Suivi du limnimètre dans le temps.....	59

ANNEXE 1 Beaucaire – Echantillon complet

Tableau 9 – Beaucaire – Echantillon complet (classé par débit croissant)

<i>N°</i>	<i>Date</i>	<i>Cote (m)</i>	<i>Débit (m³/s)</i>	<i>Type de jaugeage</i>	<i>Incertitude (k=2)</i>
1	18/10/2003	0,87	559	ADCP	5%
2	18/10/2003	0,89	596	ADCP	5%
3	29/11/01	0,99	785	ADCP	5%
4	26/08/97	1,03	762	ADCP	5%
5	09/11/95	1,23	1055	ADCP	5%
6	29/11/01	1,37	954	ADCP	5%
7	29/11/01	1,44	1088	ADCP	5%
8	08/04/2003	1,47	1 014	ADCP	5%
9	09/11/95	1,48	1070	ADCP	5%
10	08/04/2003	1,48	965	ADCP	5%
11	31/10/95	1,49	1035	ADCP	5%
12	02/09/99	1,57	1090	ADCP	5%
13	09/08/01	1,60	1098	ADCP	5%
14	27/07/95	1,63	1089	ADCP	5%
15	27/07/95	1,64	1100	ADCP	5%
16	10/06/96	1,96	1260	ADCP	5%
17	10/06/96	1,98	1303	ADCP	5%
18	01/07/99	2,01	1394	ADCP	5%
19	01/07/99	2,03	1414	ADCP	5%
20	20/02/01	2,07	1477	ADCP	5%
21	14/05/98	2,08	1327	ADCP	5%
22	08/10/2003	2,36	1 724	ADCP	5%
23	08/10/2003	2,44	1 778	ADCP	5%
24	08/10/2003	2,55	1 834	ADCP	5%
25	12/09/02	2,70	1766	ADCP	5%
26	12/09/02	2,72	1758	ADCP	5%
27	21/06/95	2,80	1866	ADCP	5%
28	06/03/97	3,01	1950	ADCP	5%
29	23/03/94	3,25	1974	Toutes profondeurs	7%
30	23/03/94	3,28	1974	Surface	10%

N°	Date	Cote (m)	Débit (m³/s)	Type de jaugage	Incertitude (k=2)
31	23/03/94	3,29	2128	Toutes profondeurs	7%
32	29/09/94	3,31	2220	ADCP	5%
33	16/02/00	3,36	2082	ADCP	5%
34	16/02/00	3,48	2198	ADCP	5%
35	06/04/95	3,55	2429	ADCP	5%
36	06/04/95	3,57	2421	ADCP	5%
37	21/05/96	3,69	2286	ADCP	5%
38	21/05/96	3,73	2406	ADCP	5%
39	05/11/92	3,73	2437	Toutes profondeurs	7%
40	17/02/00	3,91	2809	ADCP	5%
41	23/05/95	3,96	2785	ADCP	5%
42	23/05/95	4,16	3053	ADCP	5%
43	22/04/98	4,24	3032	ADCP	5%
44	18/10/00	4,33	3205	ADCP	5%
45	18/10/00	4,37	3221	ADCP	5%
46	06/03/02	4,40	3182	ADCP	5%
47	06/03/02	4,40	3164	ADCP	5%
48	11/01/01	4,98	3477	ADCP	5%
49	24/02/95	5,00	3532	ADCP	5%
50	24/02/95	5,00	3532	Toutes profondeurs	7%
51	24/02/95	5,01	3570	Toutes profondeurs	7%
52	03/03/99	5,02	3630	ADCP	5%
53	26/04/95	5,20	3822	ADCP	5%
54	25/02/99	5,81	4295	ADCP	5%
55	24/02/99	6,19	4630	ADCP	5%
56	24/02/99	6,35	4850	ADCP	5%
57	18/11/92	6,40	4657	Toutes profondeurs	7%
58	18/11/92	6,40	4748	Surface	10%
59	15/11/00	6,77	5451	ADCP	5%
60	15/11/02	6,81	5353	ADCP	5%

N°	Date	Cote (m)	Débit (m³/s)	Type de jaugeage	Incertitude (k=2)
61	15/11/02	6,82	5457	ADCP	5%
62	24/09/93	6,85	5502	Toutes profondeurs	7%
63	14/10/93	7,17	5950	Surface	10%
64	24/11/92	7,20	5407	Toutes profondeurs	7%
65	24/11/92	7,20	5435	Surface	10%
66	09/03/01	7,35	5772	ADCP	5%
67	14/10/93	7,35	6093	Toutes profondeurs	7%
68	10/03/01	7,40	5854	ADCP	5%
69	24/09/93	7,40	5930	Toutes profondeurs	7%
70	20/12/97	7,46	5918	ADCP	5%
71	15/03/01	7,47	5865	ADCP	5%
72	15/11/02	7,50	6269	ADCP	5%
73	15/11/02	7,52	6201	ADCP	5%
74	14/10/93	7,65	6178	Surface	10%
75	24/09/93	7,70	6278	Surface	10%
76	13/01/96	7,71	6048	ADCP	5%
77	24/09/93	7,72	6423	Surface	10%
78	13/01/96	7,80	6170	ADCP	5%
79	06/10/93	7,85	6148	Toutes profondeurs	7%
80	06/10/93	7,86	6187	Surface	10%
81	13/01/96	7,90	6376	ADCP	5%
82	14/11/96	8,31	6520	ADCP	5%
83	24/11/00	8,32	7124	ADCP	5%
84	14/11/96	8,42	6759	ADCP	5%
85	16/11/02	8,59	7353	ADCP	5%
86	16/11/02	8,60	7435	ADCP	5%
87	10/09/02	8,95	6652	ADCP	5%
88	10/09/02	9,20	6961	ADCP	5%
89	18/11/02	9,55	8537	ADCP	5%
90	18/11/02	9,55	8399	ADCP	5%

N°	Date	Cote (m)	Débit (m³/s)	Type de jaugeage	Incertitude (k=2)
91	09/10/93	9,64	9302	Débordement	8%
92	09/10/93	9,72	9555	Débordement	8%
93	27/11/02	9,76	8637	ADCP	5%
94	10/10/93	9,84	9233	Surface	10%
95	04/12/03	9,85	8394	Surface	10%
96	10/10/93	9,89	9439	Débordement	8%
97	10/10/93	9,90	9572	Surface débordement	10%
98	04/12/03	9,93	9001	ADCP	5%
99	08/01/94	10,38	10883	Surface	10%
100	08/01/94	10,48	10984	Surface	10%
101	04/12/03	10,49	9851	ADCP	5%
102	08/01/94	10,50	11029	Surface	10%
103	04/12/03	10,74	10401	ADCP	5%
104	04/12/03	10,75	10810	ADCP	5%
105	03/12/03	10,88	10881	ADCP	5%
106	03/12/03	10,92	10863	ADCP	5%
107	03/12/03	11,03	10184	Surface	10%
108	03/12/03	11,10	11051	ADCP	5%

ANNEXE 2 Beaucaire – Construction de l'échantillon n° 1

Tableau 10 – Beaucaire – Jaugeages de l'échantillon n° 1

N°	Date	Cote (m)	Débit (m³/s)	Type de jaugeage	Incertitude (k=2)
1	06/03/97	3,01	1950	ADCP	5%
2	23/03/94	3,25	1974	Toutes profondeurs(*)	7%
3	23/03/94	3,29	2128	Toutes profondeurs	7%
4	29/09/94	3,31	2220	ADCP	5%
5	16/02/00	3,36	2082	ADCP	5%
6	16/02/00	3,48	2198	ADCP	5%
7	06/04/95	3,55	2429	ADCP	5%
8	06/04/95	3,57	2421	ADCP	5%
9	21/05/96	3,69	2286	ADCP	5%
10	21/05/96	3,73	2406	ADCP	5%
11	05/11/92	3,73	2437	Toutes profondeurs	7%
12	17/02/00	3,91	2809	ADCP	5%
13	23/05/95	3,96	2785	ADCP	5%
14	23/05/95	4,16	3053	ADCP	5%
15	22/04/98	4,24	3032	ADCP	5%
16	18/10/00	4,33	3205	ADCP	5%
17	18/10/00	4,37	3221	ADCP	5%
18	06/03/02	4,40	3182	ADCP	5%
19	06/03/02	4,40	3164	ADCP	5%
20	11/01/01	4,98	3477	ADCP	5%
21	24/02/95	5,00	3532	ADCP	5%
22	24/02/95	5,00	3532	Toutes profondeurs	7%
23	24/02/95	5,01	3570	Toutes profondeurs	7%
24	03/03/99	5,02	3630	ADCP	5%
25	26/04/95	5,20	3822	ADCP	5%
26	25/02/99	5,81	4295	ADCP	5%
27	24/02/99	6,19	4630	ADCP	5%
28	24/02/99	6,35	4850	ADCP	5%
29	18/11/92	6,40	4657	Toutes profondeurs	7%
30	15/11/00	6,77	5451	ADCP	5%

N°	Date	Cote (m)	Débit (m³/s)	Type de jaugeage	Incertitude (k=2)
31	15/11/02	6,81	5353	ADCP	5%
32	15/11/02	6,82	5457	ADCP	5%
33	24/09/93	6,85	5502	Toutes profondeurs	7%
34	14/10/93	7,17	5950	Surface(**)	10%
35	24/11/92	7,20	5407	Toutes profondeurs	7%
36	09/03/01	7,35	5772	ADCP	5%
37	14/10/93	7,35	6093	Toutes profondeurs	7%
38	10/03/01	7,40	5854	ADCP	5%
39	24/09/93	7,40	5930	Toutes profondeurs	7%
40	20/12/97	7,46	5918	ADCP	5%
41	15/03/01	7,47	5865	ADCP	5%
42	15/11/02	7,50	6269	ADCP	5%
43	15/11/02	7,52	6201	ADCP	5%
44	14/10/93	7,65	6178	Surface	10%
45	24/09/93	7,70	6278	Surface	10%
46	13/01/96	7,71	6048	ADCP	5%
47	13/01/96	7,80	6170	ADCP	5%
48	06/10/93	7,85	6148	Toutes profondeurs	7%
49	13/01/96	7,90	6376	ADCP	5%
50	14/11/96	8,31	6520	ADCP	5%
51	24/11/00	8,32	7124	ADCP	5%
52	14/11/96	8,42	6759	ADCP	5%
53	16/11/02	8,59	7353	ADCP	5%
54	16/11/02	8,60	7435	ADCP	5%
55	18/11/02	9,55	8537	ADCP	5%
56	18/11/02	9,55	8399	ADCP	5%
57	09/10/93	9,64	9302	Débordement(***)	8%
58	09/10/93	9,72	9555	Débordement	8%
59	27/11/02	9,76	8637	ADCP	5%
60	10/10/93	9,89	9439	Débordement	8%

N°	Date	Cote (m)	Débit (m³/s)	Type de jaugeage	Incertitude (k=2)
61	04/12/03	9,93	9001	ADCP	5%
62	08/01/94	10,38	10883	Surface	10%
63	08/01/94	10,48	10984	Surface	10%
64	04/12/03	10,49	9851	ADCP	5%
65	08/01/94	10,50	11029	Surface	10%
66	04/12/03	10,74	10401	ADCP	5%
67	04/12/03	10,75	10810	ADCP	5%
68	03/12/03	10,88	10881	ADCP	5%
69	03/12/03	10,92	10863	ADCP	5%
70	03/12/03	11,10	11051	ADCP	5%

(*) : jaugeage au moulinet complet

(**) : jaugeage au moulinet en surface

(***) : prise en compte d'un débordement estimé par les jaugeurs

ANNEXE 3 Beaucaire – Construction de l'échantillon n° 2

Tableau 11 – Beaucaire – Jaugeages de l'échantillon n° 2

<i>N°</i>	<i>Date</i>	<i>Cote (m)</i>	<i>Débit (m³/s)</i>	<i>Type de jaugeage</i>	<i>Incertitude (k=2)</i>
1	05/11/92	3,73	2437	Toutes profondeurs	7%
2	18/11/92	6,40	4657	Toutes profondeurs	7%
3	24/09/93	6,85	5502	Toutes profondeurs	7%
4	14/10/93	7,17	5950	Surface	10%
5	24/11/92	7,20	5407	Toutes profondeurs	7%
6	14/10/93	7,35	6093	Toutes profondeurs	7%
7	24/09/93	7,40	5930	Toutes profondeurs	7%
8	14/10/93	7,65	6178	Surface	10%
9	24/09/93	7,70	6278	Surface	10%
10	06/10/93	7,85	6148	Toutes profondeurs	7%
11	09/10/93	9,64	9302	Débordement	8%
12	09/10/93	9,72	9555	Débordement	8%
13	10/10/93	9,89	9439	Débordement	8%
14	08/01/94	10,38	10883	Surface	10%
15	08/01/94	10,48	10984	Surface	10%
16	08/01/94	10,50	11029	Surface	10%

ANNEXE 4 Beaucaire – Construction de l'échantillon n° 3

Tableau 12 – Beaucaire – Jaugeages de l'échantillon n° 3

N°	Date	Cote (m)	Débit (m ³ /s)	Type de jaugeage	Incertitude (k=2)
1	06/03/97	3,01	1950	ADCP	5%
2	23/03/94	3,25	1974	Toutes profondeurs	7%
3	23/03/94	3,29	2128	Toutes profondeurs	7%
4	29/09/94	3,31	2220	ADCP	5%
5	16/02/00	3,36	2082	ADCP	5%
6	16/02/00	3,48	2198	ADCP	5%
7	06/04/95	3,55	2429	ADCP	5%
8	06/04/95	3,57	2421	ADCP	5%
9	21/05/96	3,69	2286	ADCP	5%
10	21/05/96	3,73	2406	ADCP	5%
11	17/02/00	3,91	2809	ADCP	5%
12	23/05/95	3,96	2785	ADCP	5%
13	23/05/95	4,16	3053	ADCP	5%
14	22/04/98	4,24	3032	ADCP	5%
15	18/10/00	4,33	3205	ADCP	5%
16	18/10/00	4,37	3221	ADCP	5%
17	06/03/02	4,40	3182	ADCP	5%
18	06/03/02	4,40	3164	ADCP	5%
19	11/01/01	4,98	3477	ADCP	5%
20	24/02/95	5,00	3532	ADCP	5%
21	24/02/95	5,00	3532	Toutes profondeurs	7%
22	24/02/95	5,01	3570	Toutes profondeurs	7%
23	03/03/99	5,02	3630	ADCP	5%
24	26/04/95	5,20	3822	ADCP	5%
25	25/02/99	5,81	4295	ADCP	5%
26	24/02/99	6,19	4630	ADCP	5%
27	24/02/99	6,35	4850	ADCP	5%
28	15/11/00	6,77	5451	ADCP	5%
29	15/11/02	6,81	5353	ADCP	5%
30	15/11/02	6,82	5457	ADCP	5%

N°	Date	Cote (m)	Débit (m³/s)	Type de jaugeage	Incertitude (k=2)
31	09/03/01	7,35	5772	ADCP	5%
32	10/03/01	7,40	5854	ADCP	5%
33	20/12/97	7,46	5918	ADCP	5%
34	15/03/01	7,47	5865	ADCP	5%
35	15/11/02	7,50	6269	ADCP	5%
36	15/11/02	7,52	6201	ADCP	5%
37	13/01/96	7,71	6048	ADCP	5%
38	13/01/96	7,80	6170	ADCP	5%
39	13/01/96	7,90	6376	ADCP	5%
40	14/11/96	8,31	6520	ADCP	5%
41	24/11/00	8,32	7124	ADCP	5%
42	14/11/96	8,42	6759	ADCP	5%
43	16/11/02	8,59	7353	ADCP	5%
44	16/11/02	8,60	7435	ADCP	5%
45	18/11/02	9,55	8537	ADCP	5%
46	18/11/02	9,55	8399	ADCP	5%
47	27/11/02	9,76	8637	ADCP	5%
48	04/12/03	9,93	9001	ADCP	5%
49	04/12/03	10,49	9851	ADCP	5%
50	04/12/03	10,74	10401	ADCP	5%
51	04/12/03	10,75	10810	ADCP	5%
52	03/12/03	10,88	10881	ADCP	5%
53	03/12/03	10,92	10863	ADCP	5%
54	03/12/03	11,10	11051	ADCP	5%

ANNEXE 5 Beaucaire – Courbes de l'échantillon n° 2

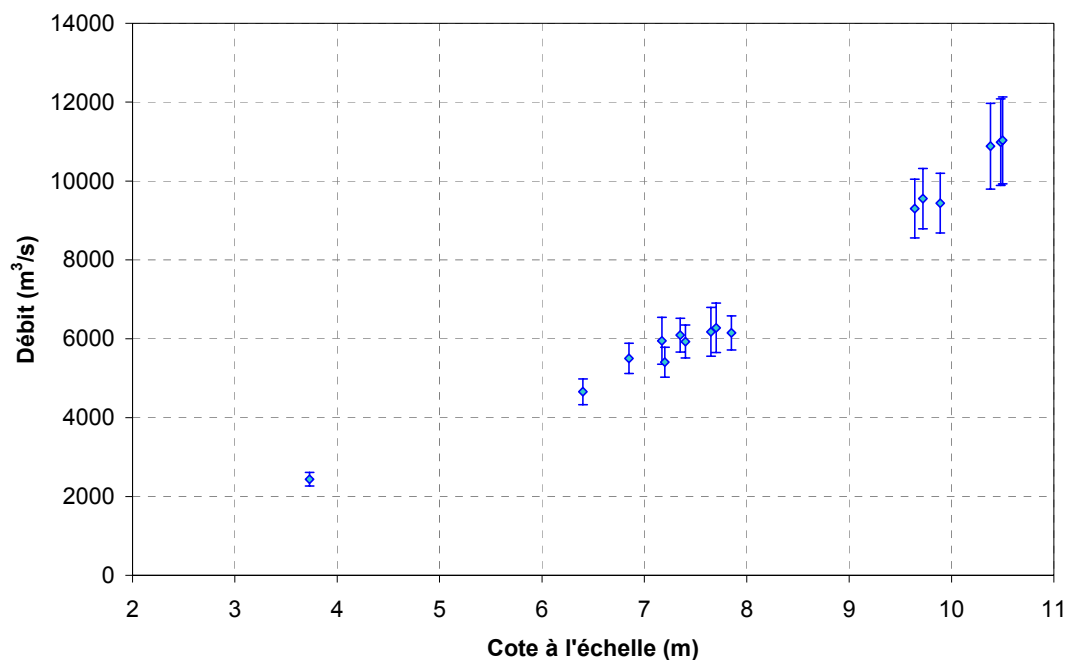


Figure 26 - Beaucaire - Échantillon n° 2 avec incertitudes associées aux débits jaugés

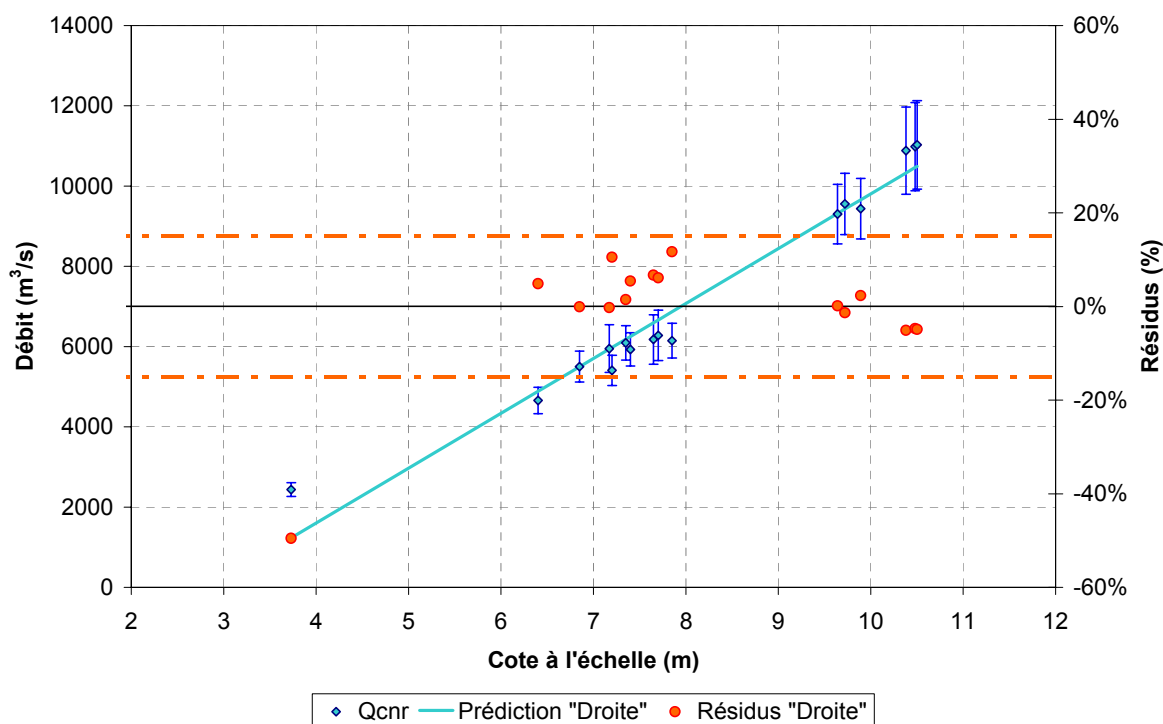


Figure 27 - Beaucaire - Échantillon n° 2 – Loi polynomiale degré 1

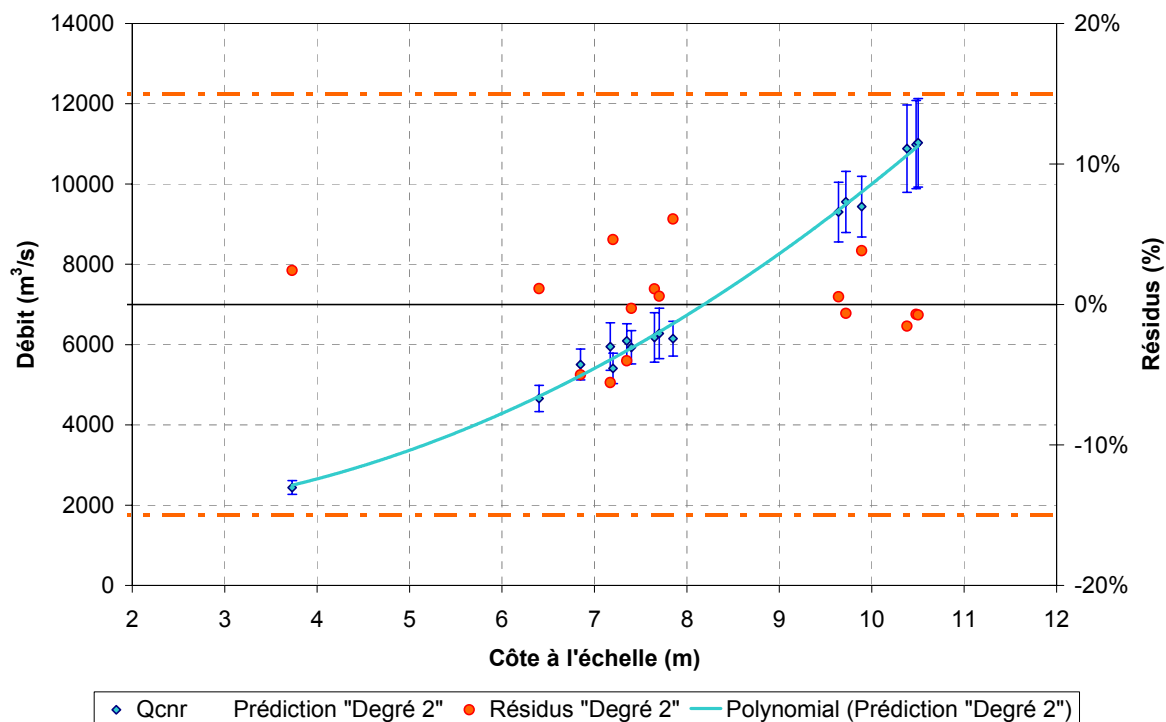


Figure 28 - Beaucaire - Échantillon n° 2 – Loi polynomiale degré 2

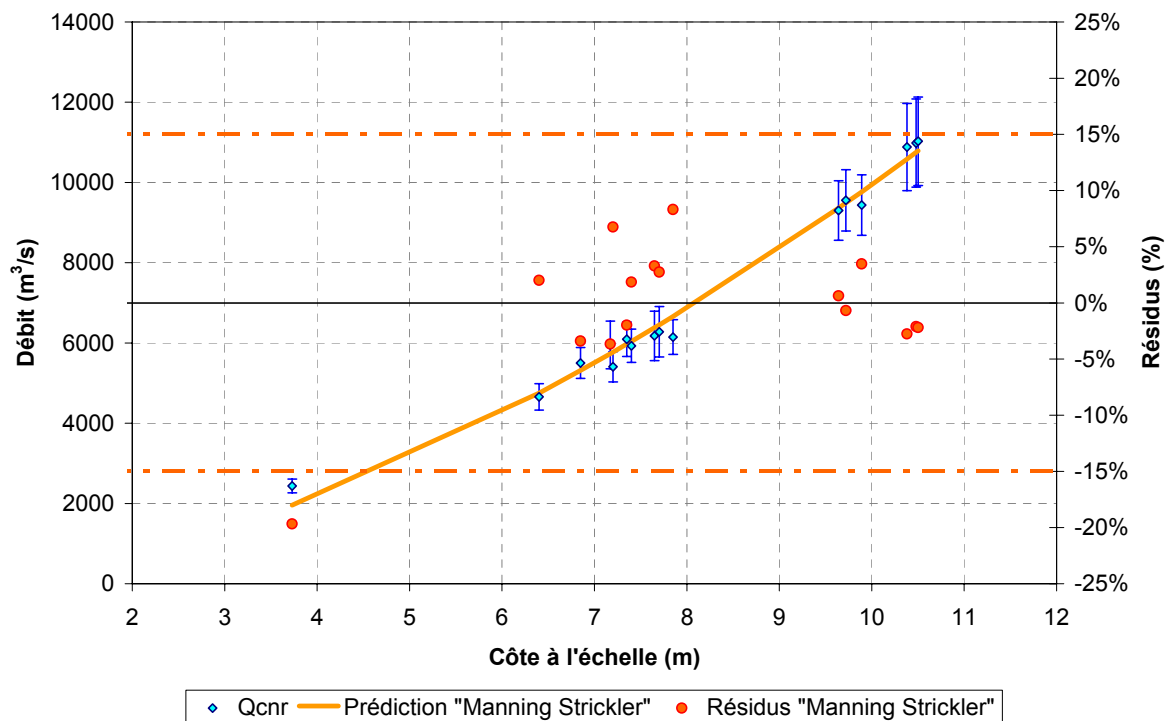


Figure 29 - Beaucaire - Échantillon n° 2 – Loi Manning-Strickler

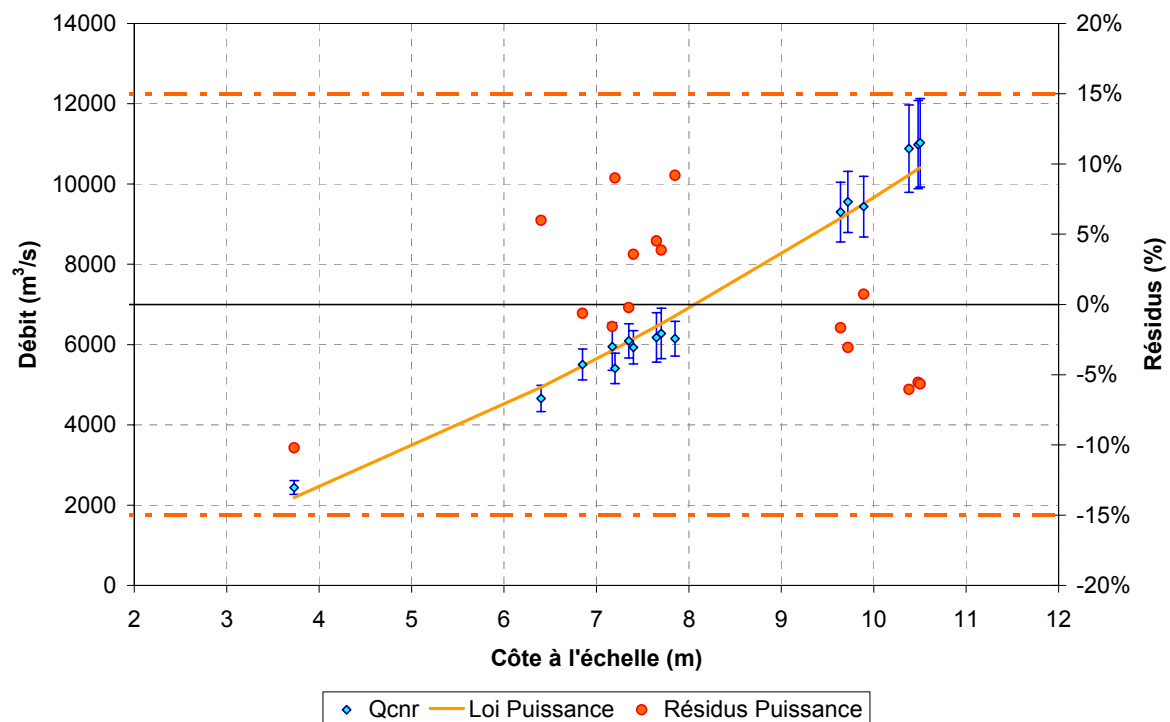


Figure 30 - Beaucaire - Échantillon n° 2 – Loi Puissance

ANNEXE 6 Beaucaire – Courbes de l'échantillon n° 3

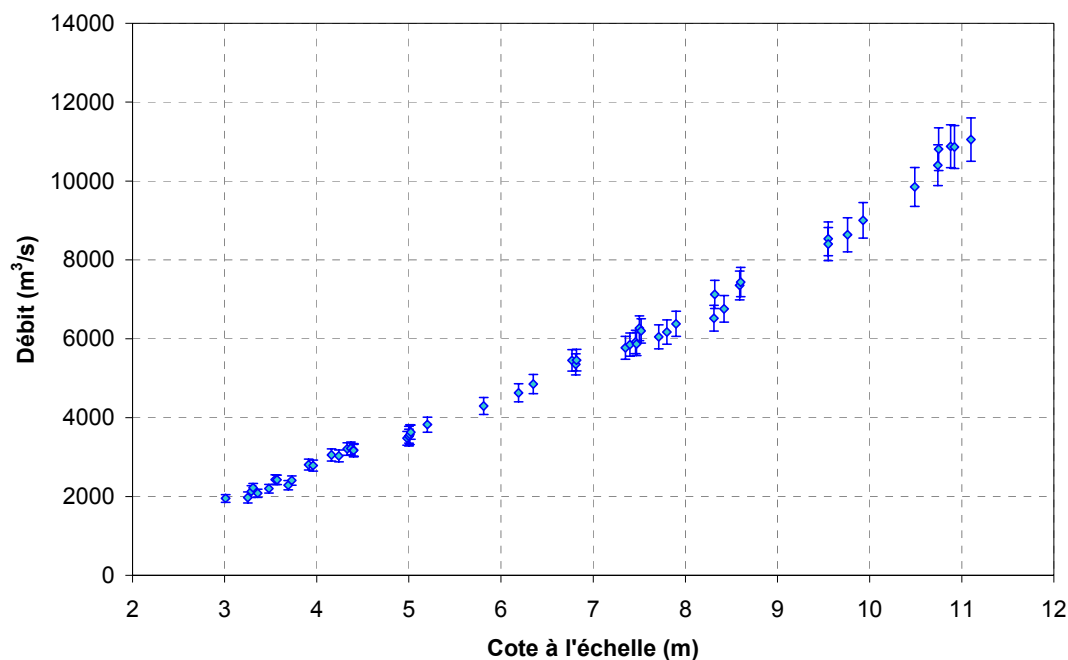


Figure 31 - Beaucaire - Échantillon n° 3 avec incertitudes associées aux débits jaugés

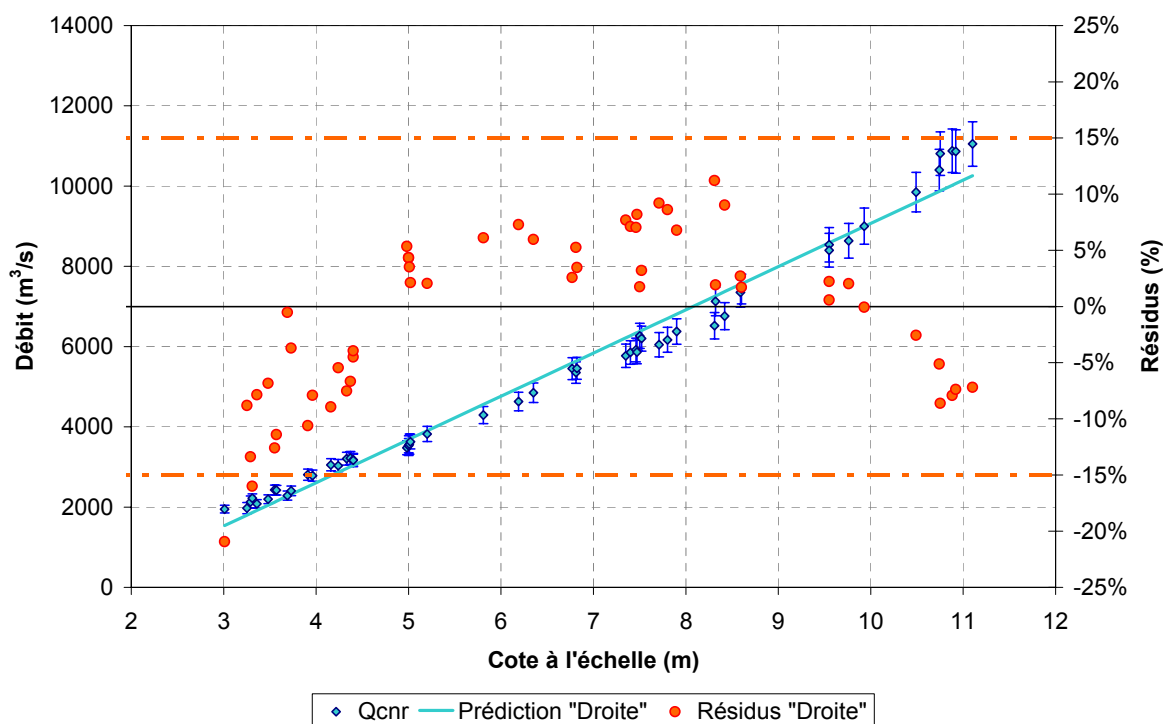


Figure 32 - Beaucaire - Échantillon n° 3 – Loi polynomiale degré 1

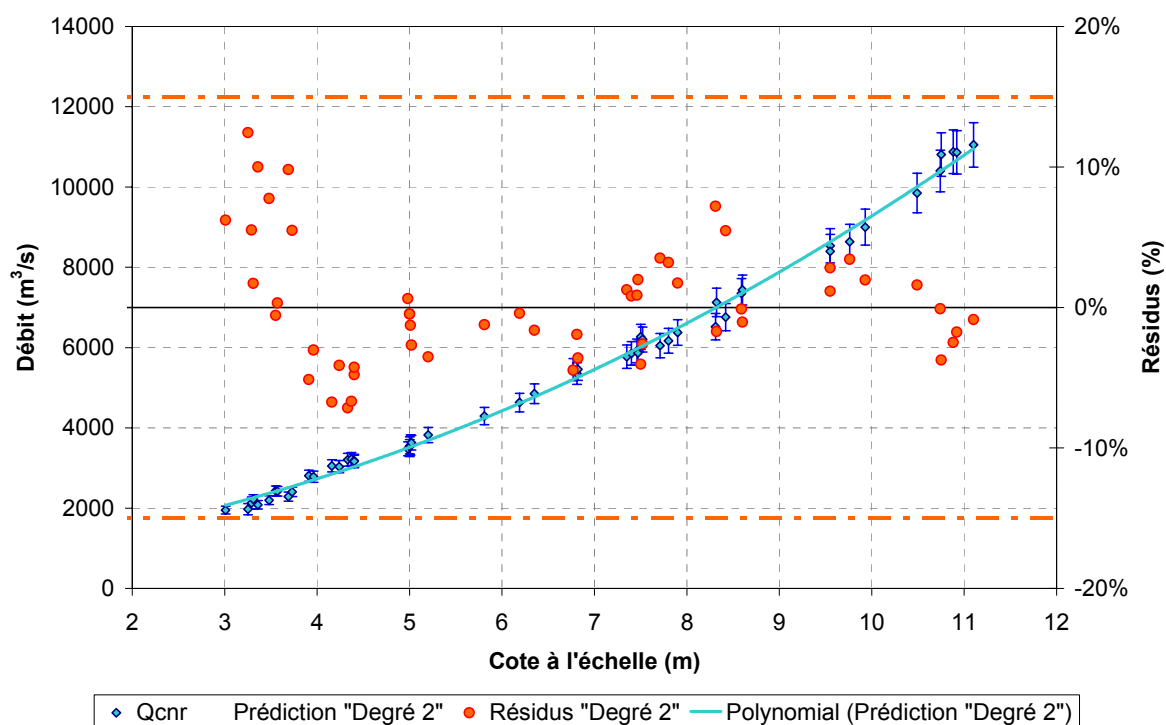


Figure 33 - Beaucaire - Échantillon n° 3 – Loi polynomiale degré 2

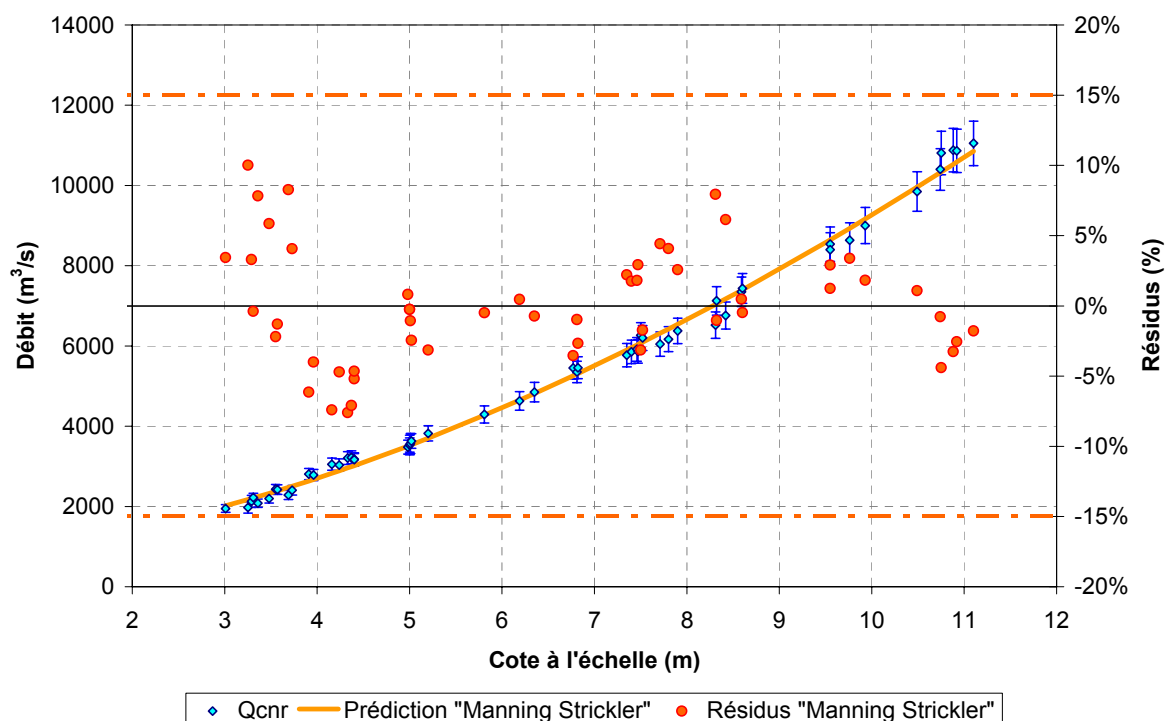


Figure 34 - Beaucaire - Échantillon n° 3 – Loi Manning-Strickler

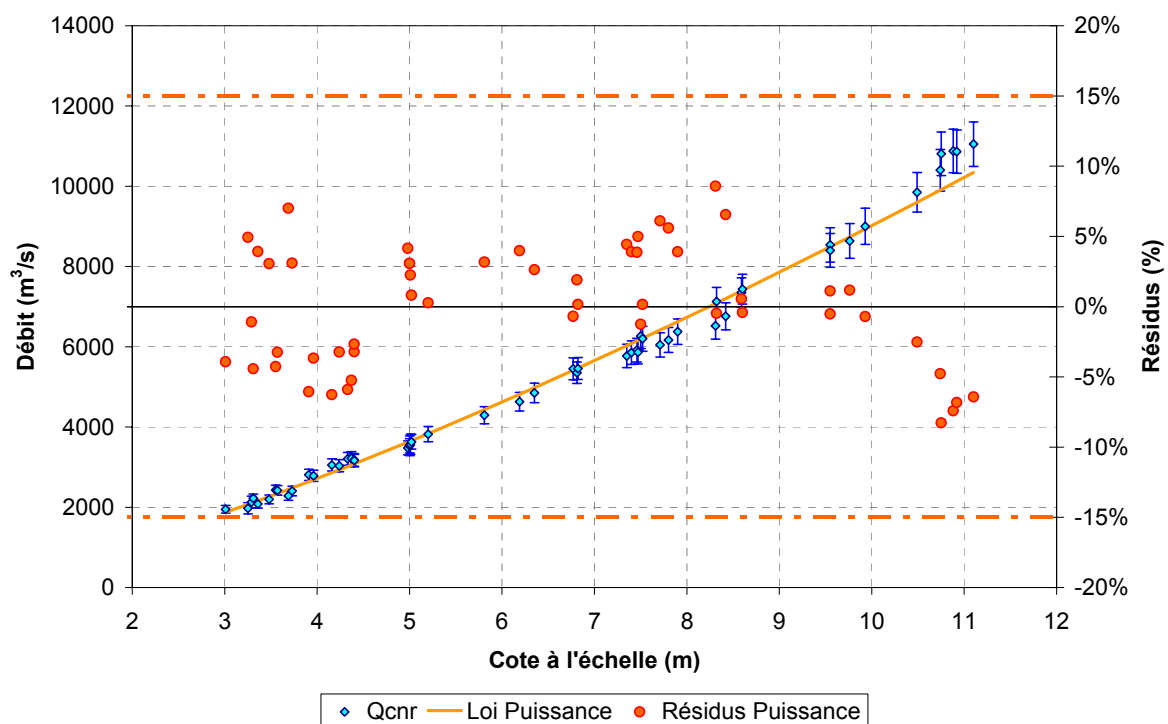


Figure 35 - Beaucaire - Échantillon n° 3 – Loi Puissance

ANNEXE 7 Beaucaire – Coefficients des courbes

		Modèle polynomial degré 2 Domaine complet	Modèle Manning-Strickler Domaine complet	Modèle Manning-Strickler 1 ^{er} domaine (h<8,50m)	Modèle Manning-Strickler 2 ^{ème} domaine (h>8,50m)	Modèle puissance Domaine complet
		$Q = a + b \cdot h + c$	$Q = b \cdot h^{5/3} + a$	$Q = b \cdot h^{5/3} + a$	$Q = b \cdot h^{5/3} + a$	$Q = a \cdot h^b$
Échantillon n° 1	a	1053,65	768,00	973,13	-205,22	423,70
	b	129,85	187,18	175,23	209,61	1,34
	c	71,44	-	-	-	-
Échantillon n° 2	a	1843,63	43,14	858,13	-2518,67	301,24
	b	-206,37	213,39	179,78	269,22	1,5064
	c	102,22	-	-	-	-
Échantillon n° 3	a	804,41	884,60	980,72	-1375,66	442,82
	b	237,16	180,49	174,81	227,22	1,309
	c	61,03	-	-	-	-

ANNEXE 8 Beaucaire – Suivi du limnimètre dans le temps

Date	Niveau échelle	Niveau appareil	Ecart échelle - appareil	Recalage	Date	Niveau échelle	Niveau appareil	Ecart échelle - appareil	Recalage
04/07/1996	0,85	0,86	-0,01	non	18/10/2000	4,37	4,41	-0,04	oui
03/10/1996	1,1	1,1	0	non	24/11/2000	8,32	8,32	0	non
13/11/1996	9,42	9,37	0,05	oui	11/01/2001	4,98	4,98	0	non
09/12/1996	4,53	4,56	-0,03	non	20/02/2001	2,05	2,07	-0,02	non
25/02/1997	2,99	3	-0,01	non	09/08/2001	1,59	1,6	-0,01	non
05/03/1997	2,9	2,91	-0,01	non	06/09/2001	1,7	1,66	0,04	non(*)
14/04/1997	1,09	1,09	0	non	11/12/2001	1,71	1,743	-0,033	non
29/07/1997	2,08	2,1	-0,02	non	06/03/2002	4,4	4,46	-0,06	oui
26/08/1997	1,03	1,04	-0,01	non	14/05/2002	2,02	1,99	0,03	oui
27/11/1997	2,52	2,5	0,02	non	10/09/2002	9,3	9,19	0,11	oui
20/12/1997	7,42	7,4	0,02	non	12/09/2002	2,7	2,69	0,01	non
28/01/1998	3,01	3,01	0	non	24/10/2002	3,89	3,89	0	non
19/03/1998	1,64	1,65	-0,01	non	18/11/2002	9,56	9,37	0,19	non(**)
27/03/1998	1,47	1,45	0,02	non	25/11/2002	9,58	9,58	0	non
22/04/1998	4,23	4,21	0,02	non	26/11/2002	10,13	10,12	0,01	non
14/05/1998	2,03	2,05	-0,02	non	27/11/2002	9,8	9,83	-0,03	non
28/05/1998	5,11	5,11	0	non	17/01/2003	2,69	2,69	0	non
30/06/1998	1,53	1,54	-0,01	non	28/02/2003	1,99	1,99	0	non
26/11/1998	1,63	1,65	-0,02	non	08/04/2003	1,47	1,52	-0,05	oui
24/02/1999	6,34	6,35	-0,01	non	08/10/2003	2,56	2,72	-0,16	oui
14/04/1999	2,26	2,28	-0,02	oui	18/10/2003	0,87	0,91	-0,04	oui
29/06/1999	2,04	2,04	0	non	12/11/2003	1,24	1,24	0	non
01/07/1999	2	2	0	non	02/12/2003	9,84	9,87	-0,03	non
30/08/1999	1,34	1,34	0	non	03/12/2003	11,15	11,1	0,05	non(**)
16/02/2000	3,45	3,45	0	non	04/12/2003	10,29	10,42	-0,13	non(**)
27/04/2000	2,93	2,93	0	non	05/12/2003	7	7,16	-0,16	non(**)
					31/12/2003	1,99	3,11	-1,12	oui(***)

(*) fort batillage

(**) crue

(***) sonde envasée